



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **ANÁLISE DE UMA MÁQUINA PARA CONVERSÃO TERMOMECÂNICA DE ENERGIA BASEADA EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

Por,  
**Gabriel Queiroz Negrão**

**Brasília, 5 de Julho de 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# ANÁLISE DE UMA MÁQUINA PARA CONVERSÃO TERMOMECÂNICA DE ENERGIA BASEADA EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

POR,

**Gabriel Queiroz Negrão**

Relatório submetido como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM (Orientador)

\_\_\_\_\_

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Prof. Aline Souza de Paula, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Brasília, 5 de Julho de 2012.

### **Dedicatória**

*Dedico o presente trabalho aos meus pais. Eles me carregaram até aqui, e neste momento faço uma pequena retribuição por toda minha vida. Além deles, dedico a “todos os meus amigos e camaradinhas que me respeitam”. Obrigado a todos.*

*Gabriel Queiroz Negrão*

## **Agradecimentos**

*Agradeço aos meus pais pela vida. Por uma vida privilegiada, por sua dedicação incondicional, pela oportunidade da boa educação, direito aos estudos e por sempre, sempre me apoiarem. Novamente os agradeço pela família, por irmãos preciosos. Agradeço aos amigos verdadeiros que conquistei durante a vida e a uma pessoa singular neste mundo, minha namorada que me conquistou em olhar. Finalmente agradeço a todos os professores e funcionários desta grande instituição – a Universidade de Brasília que me proporcionou uma grande realização na vida. Dedico um agradecimento especial ao meu orientador professor Edson Paulo da Silva.*

*Gabriel Queiroz Negrão.*

---

## RESUMO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) consistem de um grupo de materiais metálicos que possuem a habilidade de retornar a um formato ou tamanho previamente definido quando submetidas a um ciclo termomecânico adequado. O efeito memória de forma ocorre devido a mudanças na estrutura cristalina do material, dependentes da temperatura e/ou da tensão às quais estão sujeitas tais ligas. A característica principal destes materiais é a habilidade de sofrer grandes deformações e, em seguida, recuperar sua forma original quando a carga é removida ou o material é aquecido. Essas ligas podem ser usadas para construir desde atuadores leves e silenciosos até máquinas térmicas. O desenvolvimento de aplicações que utilizam SMA desperta a atenção para os mais diversos campos da engenharia. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma análise de uma máquina térmica baseada em SMA e, a partir daí, avaliar a aplicabilidade do princípio empregado nesta máquina para desenvolver um protótipo vislumbrando sua aplicação no aproveitamento da energia térmica de gases de escape automotivo.

---

## ABSTRACT

The shape memory alloys - SMA are a group of metallic materials that have the ability to return to a previously defined shape or size when subjected to an appropriate thermal procedure. The shape memory effect happens due to changes in the crystal structure of the material, depending on temperature and tension to which it is subject. The main feature of these materials is the ability to undergo large deformations and then recover its original shape when the load is removed or the material is heated. It can be used to build from silent and light actuators to heat machines. The development of SMA applications draws attention to several engineering fields. In this context, the objective of this work is to analyze the SMA based heat machine and, from that, evaluate the applicability of its principle to develop a prototype that benefits from the thermal energy from exhaust gases of an automobile.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVO .....	3
1.3	METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA .....	4
2.2	TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA TERMOELÁSTICA .....	5
2.3	FENÔMENOS DA TRANSFORMAÇÃO DE FASE EM SMA .....	7
2.4	QUASIPLASTICIDADE .....	13
2.5	EFEITO MEMÓRIA DE FORMA .....	13
2.6	PSEUDOELASTICIDADE .....	15
2.7	HISTÓRICO E APLICAÇÕES .....	16
2.8	CONVERSÃO TERMOMECÂNICA DE ENERGIA VIA SMA .....	22
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DA MÁQUINA DE GLASAUER .....</b>	<b>27</b>
3.1	CICLO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA BASEADA EM SMA .....	27
3.2	DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE GLASAUER .....	31
3.3	CONVERSÃO AXIAL-ROTACIONAL DE GLASAUER .....	32
3.4	CÁLCULO DA POTÊNCIA DA MÁQUINA DE GLASAUER .....	36
<b>4</b>	<b>APLICABILIDADE .....</b>	<b>39</b>
4.1	CONCEITO .....	39
4.2	DIMENSIONAMENTO .....	40
4.3	SIMULAÇÃO .....	41
4.4	VARIANDO O NÚMERO DE FIOS .....	44
4.5	VARIANDO O PERÍODO DE ROTAÇÃO DO EIXO .....	46
4.6	VARIANDO CARACTERÍSTICAS DOS FIOS .....	47
4.7	APLICAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA .....	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Evolução da fração volumétrica de martensita ( $\epsilon$ ) em função da temperatura (T)...	4
2.2	Representação esquemática da correspondência entre as redes cfc e tcc .....	5
2.3	Modelo simplificado da transformação martensítica.....	7
2.4	Estruturas das fases austenítica e martensítica do Ni-Ti .....	7
2.5	Transformação de fase induzida por temperatura em um SMA sem aplicação de carga.....	8
2.6	Demacragem de um material de SMA devido a aplicação de uma carga .....	9
2.7	Aquecimento de um material de SMA após o descarregamento de uma carga aplicada.....	10
2.8	Transformação de fase induzida pela temperatura em um SMA sob a ação de um carregamento .....	10
2.9	Ação do carregamento pseudoelástico .....	11
2.10	Diagrama tensão-deformação para o comportamento pseudoelástico .....	12
2.11	Diagrama de fase tensão-temperatura para um SMA .....	12
2.12	Fenômeno de quasiplasticidade em uma curva típica tensão-deformação.....	13
2.13	Diagrama tensão-deformação-temperatura para um SMA típico de Ni-Ti.....	14
2.14	Diagrama de fase para dois possíveis carregamentos pseudoelásticos .....	15
2.15	Típico ciclo de carregamento pseudoelástico de um SMA .....	16
2.16	Modelo de asa do programa SMART e vista em corte dos tubos de torque utilizados....	18
2.17	Tomada de ar do F-15 do programa SAMPSON em ensaio no túnel de vento da NASA .....	19
2.18	Ensaio em voo dos chevrons de geometria variável da Boeing.....	20
2.19	Filtro de Simon - evolução de sua forma durante o aquecimento .....	21
2.20	Implante de placa óssea utilizada para reparar uma fratura na mandíbula .....	22
2.21	Arcos ortodônticos de SMA.....	22
2.22	Máquina térmica construída por Ridgway Banks .....	23
2.23	a) motor de nitinol em forma de hélice contínua, sincronizada por engrenagens. b) forma modificada do motor "a", aqui duas polias de tamanhos diferentes sincronizam a rotação da engrenagem .....	24
2.24	Representação simplificada da máquina construída por Pachter .....	24
2.25	Representação em CAD do projeto de Wakjira .....	25
2.26	Diagrama esquemático da máquina proposta por Iwanaga.....	26
3.1	Diagrama carga-deformação de um SMA.....	27
3.2	Diagrama carga-deformação para o ciclo termomecânico ideal de uma máquina térmica de SMA.....	28
3.3	Ciclo termomecânico com SMA no diagrama $\epsilon$ -T.....	29
3.4	Diagrama carga-deformação considerando o esforço externo real inserido na máquina .....	30
3.5	Diagrama real carga-deformação .....	30
3.6	Mecanismo de Glasauer .....	31
3.7	Princípio mecânico da árvore inclinada.....	32
3.8	Diagrama carga-deformação associado ao mecanismo de Glasauer.....	37
3.9	Correspondência entre o ciclo térmico e a rotação no mecanismo de Glasauer ....	37
4.1	Catalisador selecionado para estabelecer geometria (Tuper) .....	40
4.2	Dimensões estabelecidas para o eixo principal da máquina .....	41
4.3	Formato e dimensões do recipiente que comportará o mecanismo .....	41
4.4	Gráfico demonstrativo da potência gerada pela máquina de Glasauer.....	43

4.5	Gráfico de potência por número de fios com dimensões concebidas .....	44
4.6	Gráfico de potência pelo número de fios considerando duas camadas.....	45
4.7	Potência gerada para diferentes períodos de rotação .....	47



## LISTA DE TABELAS

2.1	Características gerais das fases martensita e austenita .....	6
4.1	Relação entre o diâmetro das molas e número de fios possíveis .....	46
4.2	Propriedades mecânicas de ligas de SMA (Otsuka e Wayman. Modificada) .....	48
4.3	Potência alcançada para vários materiais .....	48
4.4	Tempo de carga de baterias (Johnson Controls) .....	50

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$F$	Força	[N]
$l$	Comprimento	[mm]
$P$	Potência	[W]
$Q$	Vazão	[L/min]
$T$	Temperatura	[°C]
$W$	Trabalho	[J]

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo de inclinação do flange
$\varepsilon$	Fração volumétrica de martensita
$\sigma$	Tensão
$\varsigma$	Razão entre o volume da fase martensítica e o volume total da liga
$\varphi$	Ângulo de rotação do fio em relação ao eixo principal
$\Delta$	Variação entre duas grandezas similares

## Subscritos

$s$	start
$f$	final
$max$	máximo(a)
$Q$	quente
$F$	frio
$t$	twinned
$d$	detwinned
$crit$	crítico(a)

## Siglas

SMA	<i>Shape Memory Alloys</i>
SME	<i>Shape memory effect</i>
NOL	<i>Naval Ordnance Laboratory</i>
HTSMA	<i>Hight temperature SMA</i>
MSMA	<i>Magnetic SMA</i>
SAMPSON	<i>Smart Aircraft and Marine Propulsion System</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
AFRL	<i>Air Force Research Laboratory</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) são materiais metálicos que apresentam a habilidade de recuperar a geometria original por meio da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, e isto ocorre devido a transformações de fases induzidas no material (Delaey et al, 1975, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987). Em outras palavras, esses materiais demonstram a capacidade de retomar uma forma ou tamanho previamente definido quando sujeitos a um ciclo térmico ou mecânico apropriado. Basicamente, as SMA apresentam dois comportamentos: efeito memória de forma e pseudoelasticidade. Elas são capazes de recuperar deformações de até 10% quando submetidas a um aquecimento, depois de terem sido deformadas abaixo de determinada temperatura característica, ou quando submetida a um ciclo de carregamento e descarregamento acima de outra temperatura características.

Atualmente, num mundo em que a multifuncionalidade e confiabilidade recebem grande ênfase, materiais inteligentes vêm ganhando muita atenção de engenheiros e cientistas. Sendo assim as SMA, que se enquadram no grupo de materiais inteligentes, possuem alto potencial de aplicação em diversas áreas. O primeiro, e talvez um dos mais conhecidos exemplos de aplicação de SMA, são as uniões de tubulações hidráulicas usados nos aviões F-14 de 1971 (Schetky et al, 1989). Essa foi a primeira aplicação comercial da SMA.

Uma das primeiras e ainda atual proposta de aplicação das SMA é para conversão de energia térmica em mecânica (Banks, 1973, GM, 2009). Em 1973, no laboratório da Universidade da Califórnia (*Lawrence Berkely Laboratory*), Banks (1973) inventou a primeira máquina térmica baseado no comportamento termomecânico das SMA. Ele encheu metade de um pequeno cilindro com água quente e a outra metade com água fria. Depois construiu uma roda de aros que continha 20 fios de Ni-Ti. Essa roda de aros de SMA girava dentro do cilindro passando pelas águas quente e fria. Quando passava pela água fria, o NiTi se contraía e conseguia fazer a roda girar. Em seguida, passando pela água quente, os fios de NiTi assumiam novamente sua forma original, possibilitando uma nova contração quando chegasse mais uma vez ao lado frio. Em 1976 Johnson (1975) propôs uma nova máquina térmica e foi um dos pioneiros na construção de máquinas de SMA. Sua máquina consiste de uma correia dentada de SMA montada sobre duas polias de tamanhos diferentes que giram no mesmo sentido e à mesma velocidade angular, por estarem associadas a um conjunto de engrenagens que sincroniza seu movimento. A correia é submetida, de um lado a um resfriamento que a deforma. Em seguida, do outro lado, ela é submetida a um aquecimento que ativa sua memória de forma fazendo-a contrair. A diferença de tensão entra as duas etapas do ciclo, resulta em um torque aplicado na polia de maior diâmetro do engrenamento, gerando assim uma saída de potência. Uma proposta similar a essa foi apresentada por Pachter

(Pachter, 1979). Ele utilizou duas correias de SMA que giravam dois sistemas de polias associados entre si por eixos. Os aquecimento e resfriamento invertidos das correias faziam os dois sistemas de polias girarem no mesmo sentido, gerando assim uma potência de eixo que era transmitida a uma finalidade externa por uma pequena polia. A existência de dois conjuntos de polias e correias trabalhando de forma alternada gerava uma rotação contínua no mecanismo. No entanto, a necessidade da utilização de correias de deslizamento no sistema diminuía bastante sua eficiência. Mais recentemente Wakjira (2001) propôs uma máquina térmica baseada nos principais princípios explorados por Johnson (1975) e Pachter (Pachter, 1979). Ele construiu um sistema de engrenamento por corrente e coroa, mas diferentemente do usual neste tipo de sistema de transmissão, ao invés de um eixo transmitir potência a outro eixo pela corrente, a própria corrente, feita de SMA, é a responsável pelo movimento das coroas e, logo, dos eixos. O autor utilizou uma corrente feita com fios de um SMA e coroas de plástico com diâmetros diferentes. Novamente, assim como no trabalho de Johnson (1975), a corrente passa por um tanque de água quente fazendo-a ser tracionada e esticada em cerca de 2% de seu comprimento original. Na outra etapa do ciclo, a corrente sofre um resfriamento que a faz contrair (também em 2%), e isso faz com que ela exerça um torque que tende a girar o sistema em um sentido.

A máquina que inspira o presente trabalho foi desenvolvida por Glasauer (1996). Sua máquina consiste basicamente de fios de SMA fixados axialmente ao longo de um tambor cilíndrico. Em um lado do tambor (“lado frio”) os fios são resfriados por um banho de óleo a 25°C e se encontram na fase martensítica. Por meio de molas fixadas em uma das extremidades do tambor os fios são deformados quasiplasticamente. No outro lado do tambor (“lado quente”) os fios são aquecidos por um banho de óleo a 85°C levando-os à fase austenítica e, conseqüentemente, à recuperação da deformação sofrida no “lado frio” do tambor. Com isso, os fios exercem uma força axial sobre um disco inclinado na outra extremidade do tambor e, por meio de um mecanismo inspirado naquele utilizado em bombas hidráulicas de pistões axiais, a força axial é convertida num torque que pode então ser utilizado para alguma finalidade.

Todas as propostas de conversão de energia térmica em mecânica explorando-se o efeito memória de forma oferecem rendimentos muito baixos em relação a outras formas de conversão termomecânica. Entretanto, tendo em vista a possibilidade de indução do efeito memória de forma com diferenças de temperatura relativamente pequenas, a maior motivação para o desenvolvimento de máquinas térmicas baseada em SMA é a possibilidade de se aproveitar energias que estão sendo desperdiçadas, por exemplo, como os gases de escape automotivo ou a água de refrigeração em sistemas de ar condicionado. Nesses casos, o custo da energia necessária para induzir a o efeito memória de forma é nulo. Assim, mesmo com baixo rendimento, a conversão de energia térmica em mecânica via SMA pode ser técnica e economicamente viável.

## **1.2 OBJETIVO**

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma análise da máquina térmica baseada em SMA proposta por Glasauer (1996) e, a partir daí, avaliar a aplicabilidade de se explorar o princípio empregado nesta máquina para desenvolver um protótipo vislumbrando sua aplicação no aproveitamento da energia térmica de gases de escape automotivo.

## **1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO**

A análise da máquina térmica de Glasauer será desenvolvida a partir do estudo do ciclo de operação da máquina e do mecanismo de conversão dos movimentos axiais em rotações. Com isso, será analisado o rendimento da máquina em função de variações de parâmetros geométricos da mesma bem como variações de propriedades termomecânicas da SMA considerada.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

No capítulo 2 será desenvolvida uma revisão de conceitos teóricos sobre ligas com memória de forma, seu comportamento termomecânico e as diversas propostas e conversão termomecânica de energia baseadas em SMA. No capítulo 3 será apresentada a máquina de Glasauer, com ênfase no ciclo de operação da máquina e no mecanismo de conversão termomecânica. No capítulo 4 será apresentado um conceito de uma máquina térmica para aplicação automotiva, bem como um cálculo de seu funcionamento. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) são materiais metálicos que apresentam a habilidade de recuperar sua geometria original previamente definida por meio da imposição de um campo de temperatura. Esta habilidade de ‘memorizar’ uma forma particular é consequência direta de transformações de fase martensíticas induzidas térmica e mecanicamente (Delaey et al, 1975). Esse comportamento é fortemente dependente da temperatura, uma vez que em função dela as SMA podem existir em diferentes fases. A Figura 2.1 representa esquematicamente a evolução da fração volumétrica de martensita  $\zeta$  (razão entre o volume da fase martensítica e o volume total da liga) em função da temperatura  $T$ . São identificadas quatro temperaturas características:  $M_s$  (*martensite start*) que é a temperatura inicial de formação de martensita;  $M_f$  (*martensite finish*), temperatura final de formação de martensita;  $A_s$  (*austenite start*), temperatura inicial de formação de austenita; e  $A_f$  (*Austenite finish*) que é a temperatura final de formação de austenita.

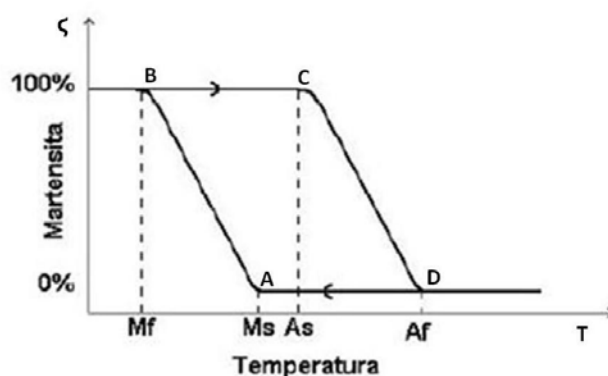


Figura 2.1: Evolução da fração volumétrica de martensita ( $\zeta$ ) em função da temperatura ( $T$ ).

Associando-se a figura 2.1 a uma amostra de SMA a uma temperatura acima de  $A_f$  e livre de tensões, o material estará na fase austenítica. Partindo do ponto D, com o decréscimo da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica. Este processo se inicia em  $T=M_s$  (ponto A) e se desenvolve até que a temperatura  $T=M_f$  seja atingida (ponto B), abaixo da qual a estrutura cristalina da liga é totalmente martensítica (Delaey, 1974). Elevando-se a temperatura, a partir do ponto B, ao se atingir  $A_s$  (ponto C), observa-se uma transformação de fase inversa (martensita transformando-se em austenita), que progride até que a temperatura  $A_f$  seja alcançada (ponto D). Acima de  $A_f$ , a liga é constituída totalmente por austenita. Estas temperaturas são características de cada liga e variam em função, basicamente, da

composição química e de tratamentos térmicos (Delaey, 1974). Portanto, as transformações de fase martensíticas desenvolvem um papel fundamental no comportamento termomecânico das SMA, e de maneira especial nas transformações martensíticas termoelásticas.

## 2.2 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA TERMOELÁSTICA

A têmpera do aço foi considerada durante séculos como uma das maravilhas da natureza e somente por volta de 1895, quando a microestrutura de um aço temperado foi descrita, o termo martensita foi introduzido. O nome martensita foi originalmente utilizado para designar o constituinte resultante da decomposição da austenita durante a têmpera dos aços comuns. A observação posterior de que algumas ligas não ferrosas também sofriam este tipo de reação fez com que o termo se estendesse à denominação de qualquer produto de uma transformação adifusional assistida por tensão (Guimarães, 1981).

Na segunda década do século passado descobriu-se a existência de uma deformação intrínseca à transformação (mudança de forma) e se propôs um mecanismo no qual a martensita poderia ser formada com um mínimo de movimentação atômica partindo da austenita. O mecanismo proposto foi descrito como deformação homogênea em que o movimento coordenado dos átomos converte a malha de Bravais cúbica de faces centradas (cfc) da austenita (*A*) na tetragonal de corpo centrado (tcc) ou cúbica de corpo centrado (ccc) da martensita (*M*). A figura 2.2 mostra de forma esquemática a correspondência entre a rede cfc e a rede tcc.

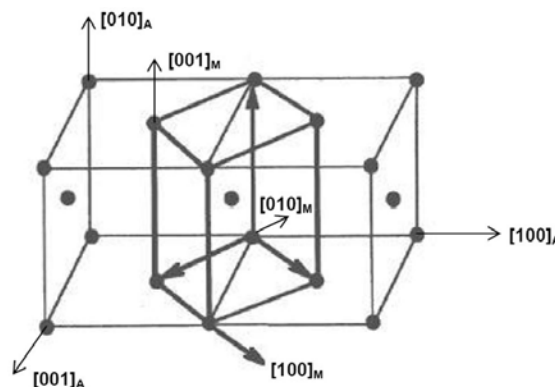


Figura 2.2: Representação esquemática da correspondência entre as redes cfc e tcc (Santos, 2008).

De acordo com Morris e Olson (1986) a transformação martensítica é considerada uma deformação plástica espontânea em resposta as forças químicas internas. Eles definiram como transformações martensíticas as transformações adifusionais em que a energia de deformação da rede distorcida controla a cinética e a morfologia do produto durante a transformação.

A transformação martensítica é um processo que ocorre por nucleação e crescimento. Esta característica da reação só foi reconhecida após a identificação da transformação isotérmica em 1950. A fase martensita resulta de uma transformação da austenita conhecida como transformação martensítica. As seguintes características definem uma transformação martensítica:

- Não difusividade: caracterizada por ser uma transformação que não depende do tempo, somente da temperatura, significa que não há movimentos atômicos em distâncias consideráveis, de forma que não há variação de composição química. A independência do tempo é uma consequência disso e logo as composições das fases mãe e produto são as mesmas;
- Movimento cooperativo de átomos: conduzem à formação de uma nova fase, mais estável, através de uma reordenação atômica a curtas distâncias;
- Existe uma correspondência cristalográfica entre a rede da martensita e a da austenita que lhe deu origem;
- Devido à diferença de volume entre as fases e a continuidade na interface, ocorre uma mudança de forma (*shape change*) que provoca relevo numa superfície pré-polida.

O início da transformação martensítica ocorre quando os primeiros volumes da fase austenítica se transformam em martensita. A temperatura na qual isso ocorre é conhecida como  $M_i$ . O resfriamento rápido da austenita impede a difusão do carbono, nitrogênio ou dos elementos de liga especiais, nela dissolvidos, para os seus lugares de preferência, como para formar carbonetos, mas em geral, não evita a transformação alotrópica do  $Fe_\gamma$  em  $Fe_\alpha$  (Santos, 2008).

Quando a transformação martensítica ocorre, a estrutura do material, cúbica de faces centradas (cfc), é transformada em cúbica de corpo centrado (ccc) por um processo que, aparentemente, pode ser descrito como um cisalhamento brusco. Na nova estrutura, os átomos de carbono, nitrogênio e demais elementos de liga permanecem em solução, mas a presença de elementos intersticiais em teores acima do limite de solubilidade da fase ccc determina a sua distorção tetragonal de corpo centrado (tcc). Após a transformação a vizinhança atômica e a composição química permanecem inalteradas (Guimarães, 1983). A figura 2.3 mostra um modelo simplificado do mecanismo envolvido na transformação martensítica.

Na tabela 2.1 estão resumidas as principais características das fases de uma transformação martensítica, ou seja, a martensita e a austenita.

Tabela 2.1: Características gerais das fases martensita e austenita.

Martensita	Austenita
Fase de baixa temperatura ( $T < M_s$ )	Fase de alta temperatura ( $T > A_s$ )
Estrutura tetragonal de corpo centrado	Estrutura geralmente cúbica
Menos rígida	Fase de maior rigidez ( $E_{AUS} \approx 3 \cdot E_{MAR}$ )
Flexível e facilmente deformável	Maior dureza e menos flexível



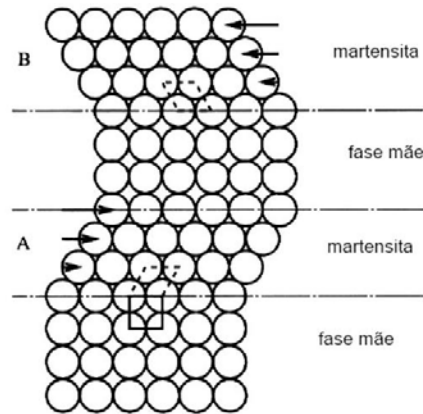


Figura. 2.3: Modelo simplificado da transformação martensítica (Morris & Olson, 1986).

Na liga de Níquel-Titânio (NiTi), a fase martensítica tem uma estrutura monoclinica B19'. Enquanto que a fase austenítica apresentará uma estrutura cúbica de corpo centrado B2, em que os átomos de níquel se encontram no centro da estrutura cúbica. A Figura 2.4 apresenta as estruturas correspondentes às fases austenítica e martensítica (Santos, 2008).

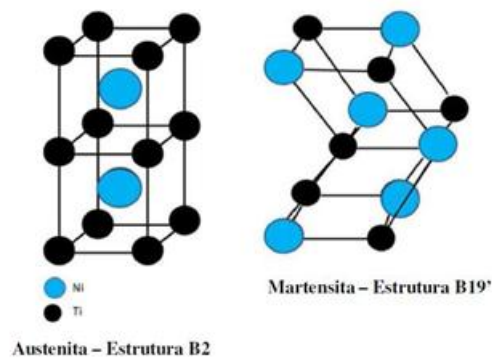


Figura 2.4: Estruturas das fases austenítica e martensítica do NiTi (Santos, 2008).

Quando solicitadas mecanicamente e em função da temperatura, as SMA apresentam basicamente três fenômenos: abaixo de  $M_f$  a quasiplasticidade, acima de  $A_f$  a pseudoelasticidade e na transição de uma temperatura inferior à  $M_s$  para uma temperatura superior à  $A_s$ , após ser deformada abaixo de  $M_s$ , o efeito memória de forma (Delaey et al, 1975, Otsuka et al, 1998, Funakubo, 1987).

## 2.3 FENÔMENOS DA TRANSFORMAÇÃO DE FASE EM SMA

As ligas com memória de forma possuem duas fases, cada uma com uma estrutura cristalina diferente e, por isso, diferentes propriedades. Uma delas é a fase em alta temperatura denominada austenita (A) e a outra, em baixa temperatura, a martensita (M). A austenita (geralmente cúbica) tem uma estrutura cristalina diferente da martensita (tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica). A

transformação de uma estrutura na outra não ocorre por difusão de átomos, mas sim por uma distorção cisalhante em sua malha cristalina. Tal transformação é conhecida como transformação martensítica. Cada cristal de martensita formado pode ter diferentes orientações de direção, chamadas de variantes. O conjunto de variantes martensíticas pode existir de duas formas: martensita maclada (*twinned* –  $M_t$ ), que é formada por uma combinação de variantes martensíticas acomodadas, e a martensita demaclada (*detwinned* –  $M_d$ ) ou reorientada, na qual uma variante específica é dominante. A reversibilidade da transformação da fase austenítica (fase mãe) para martensita (fase produto), e vice-versa, é a base do comportamento único dos materiais de memória de forma (Lagoudas, 2008).

Sob resfriamento e na ausência de uma carga aplicada, a estrutura cristalina se transforma de austenita para martensita. Essa transformação inicial resulta na formação de várias variantes martensíticas, até 24 para a liga NiTi. O arranjo das variantes ocorre de tal maneira que a variação macroscópica de forma é desprezível, resultando na martensita maclada. Quando o material é aquecido na fase martensítica, a estrutura cristalina se transforma novamente em austenita, e essa transição é chamada de transformação reversa, novamente, não há mudança de forma associada.

As estruturas cristalinas da martensita maclada e da austenita, em SMA, e as transformações que ocorrem entre elas está esquematizada na figura 2.5.

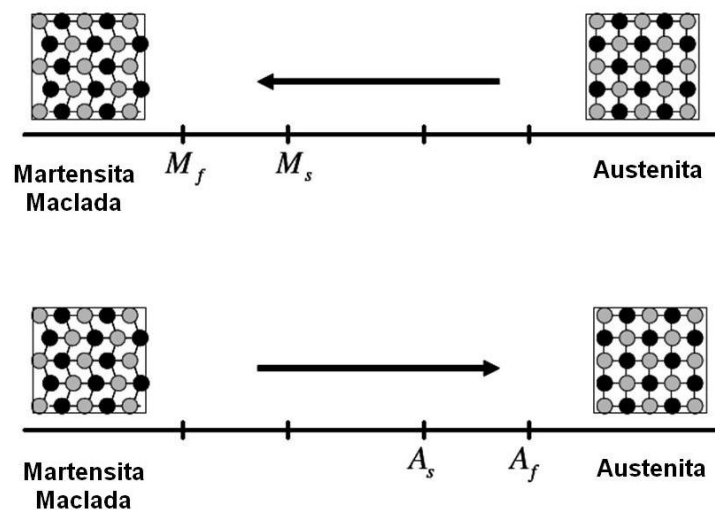


Figura 2.5: Transformação de fase induzida por temperatura em um SMA sem aplicação de carga (Lagoudas, 2008. Modificada).

Existem quatro temperaturas características associadas à transformação de fase. Durante a transformação inicial, austenita, sem carregamento, começa a se transformar em martensita maclada na temperatura inicial martensítica ( $M_s$ ), e completa sua transformação em martensita na temperatura final martensítica ( $M_f$ ). A partir desse ponto a transformação está completa, ou seja, o material está todo em uma única fase, martensita maclada. Do mesmo modo, durante o

aquecimento, a transformação reversa inicia-se na temperatura inicial austenítica ( $A_s$ ) e é concluída na temperatura final austenítica ( $A_f$ ).

Se uma carga mecânica é aplicada no material que está na fase de martensita maclada (abaixo de  $M_f$ ), é possível demaclar a martensita através da reorientação de certo número de variantes (veja figura 2.6).

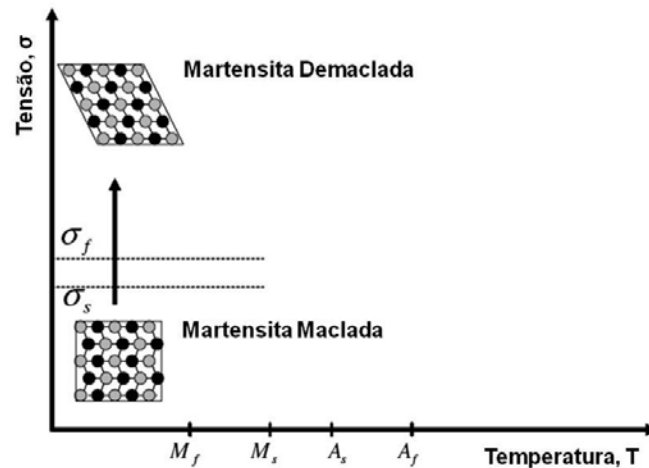


Figura 2.6: Demaclagem de um material de SMA devido a aplicação de uma carga (Lagoudas, 2008. Modificada).

O processo de demaclagem resulta em uma variação macroscópica da forma, ou seja, uma deformação, e esta nova configuração se mantém após a retirada da carga. Um aquecimento subsequente do SMA até uma temperatura superior a  $A_f$  irá acarretar na transformação reversa de fase (de martensita demaclarada para austenita) e resultará na completa recuperação da forma (veja figura 2.7). Resfriando-se o material novamente a uma temperatura menor que  $M_f$  ocorre novamente a formação de martensita maclada sem que se possa observar qualquer alteração de forma.

O processo descrito na figura 2.7 é conhecido como Efeito de Memória de Forma (SME – *shape memory effect*). O carregamento aplicado deve ser suficientemente grande para iniciar o processo de demaclagem. A tensão mínima necessária para isso é chamada de tensão inicial de demaclagem ( $\sigma_s$ ). Níveis suficientemente grandes de carga resultarão na completa demaclagem da martensita, a tensão correspondente a esta é chamada de tensão final de demaclagem ( $\sigma_f$ ).

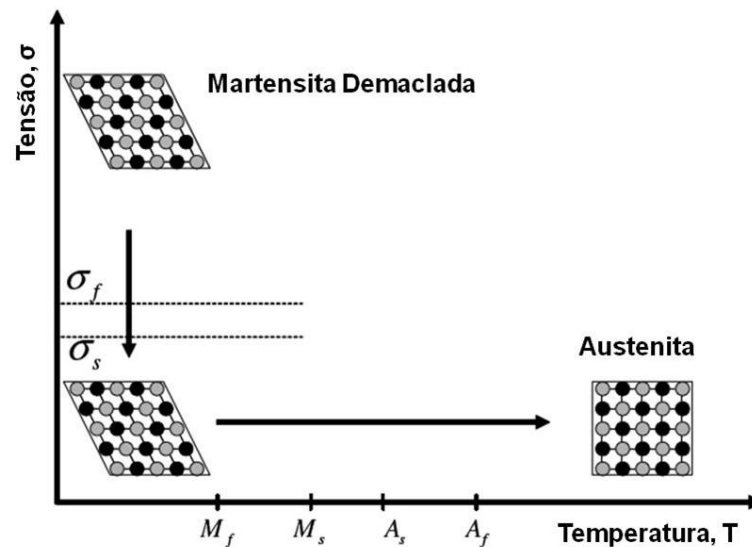


Figura 2.7: Aquecimento de um material de SMA após o descarregamento de uma carga aplicada (Lagoudas, 2008. Modificada).

Quando o material é resfriado com uma carga aplicada maior que  $\sigma_s$  na fase austenítica, a transformação de fase vai resultar na formação direta de martensita demacada, produzindo uma variação de forma. Reaquecendo o material ocorrerá a recuperação da forma enquanto a carga ainda estiver sendo aplicada. A figura 2.8 mostra de forma esquemática o processo descrito.

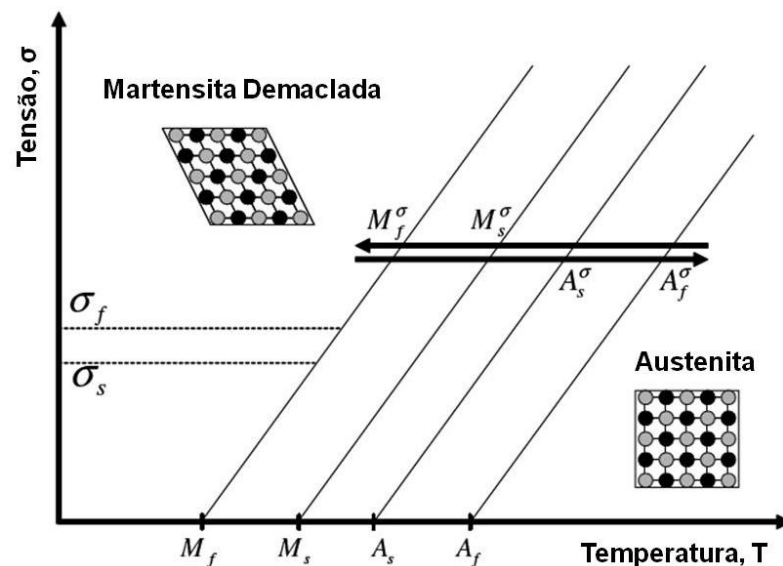


Figura 2.8: Transformação de fase induzida pela temperatura em um SMA sob a ação de um carregamento (Lagoudas, 2008. Modificada).

Percebendo-se que as transformações inicial e reversa ocorrem sobre uma determinada variação de temperatura (de  $M_s$  até  $M_f$ , e de  $A_s$  até  $A_f$ ) para um SMA, pode-se construir um

diagrama tensão-temperatura contendo a região de transformação. As temperaturas de transformação dependem fortemente da magnitude da carga aplicada, sendo que, maiores valores de carga aplicada resultarão em maiores temperaturas de transformação.

Como consequência, as regiões que representam as transformações  $A \rightarrow M_d$  e  $M_d \rightarrow A$  tem uma inclinação positiva no diagrama tensão-temperatura. Independente da natureza da carga aplicada (tração ou compressão), a temperatura de transformação aumenta com o crescimento da magnitude da carga (Lagoudas, 2008).

Sob uma carga uniaxial aplicada, as novas temperaturas de transformação podem ser representadas por  $M_f^\sigma$ ,  $M_s^\sigma$ ,  $A_s^\sigma$  e  $A_f^\sigma$  para temperatura de martensita final, martensita inicial, austenita inicial e austenita final respectivamente. Deve-se notar que a tensão ( $\sigma$ ) se refere à magnitude de um estado de tensão uniaxial ou uma medição escalar apropriada para um estado de tensão multiaxial.

Além da transformação de fase induzida termicamente, a aplicação de uma carga mecânica suficientemente grande ao material também induz uma transformação da fase austenítica. O resultado desta transformação é martensita demacliada. Se a temperatura do material for superior a temperatura  $A_f$ , uma recuperação de forma completa será observada quando a carga aplicada for retirada. Esse comportamento do material é chamado de efeito pseudoelástico. A figura 2.9 mostra esquematicamente o efeito pseudoelástico sob a aplicação de um carregamento, enquanto a alteração de forma macroscópica do material devido à carga aplicada é esquematizado no diagrama tensão-deformação mostrado na figura 2.10.

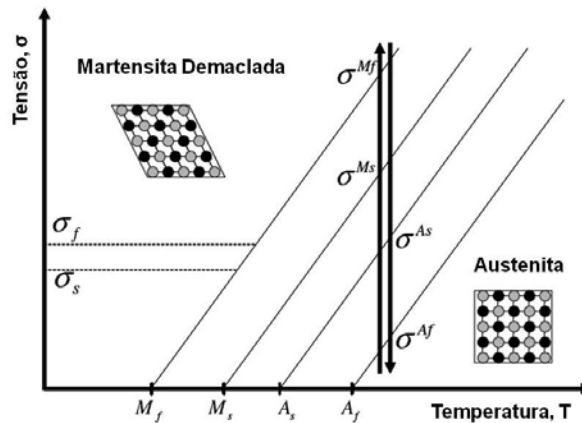


Figura 2.9: Ação do carregamento pseudoelástico (Lagoudas, 2008. Modificada).

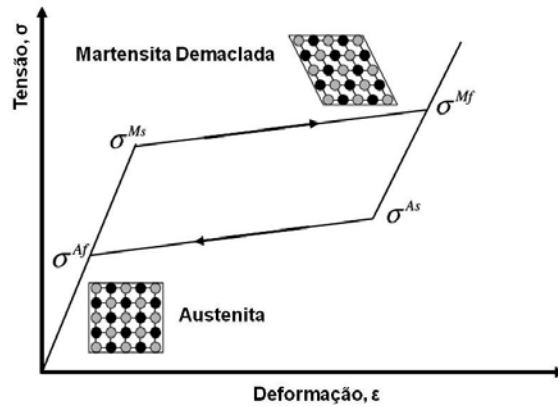


Figura 2.10: Diagrama tensão-deformação para o comportamento pseudoelástico (Lagoudas, 2008. Modificada).

Os níveis de tensão em que a martensita inicia e termina sua transformação estão indicado por  $\sigma^{Ms}$  e  $\sigma^{Mf}$ . Do mesmo modo, quando o SMA é descarregado, os níveis de tensão associados ao início e conclusão da transformação reversa da martensita para austenita estão indicados por  $\sigma^{As}$  e  $\sigma^{Af}$ . Se o material, na fase austenítica for testado em uma temperatura superior a  $M_s$  e inferior a  $A_f$ , apenas uma recuperação parcial do material será observada.

A figura 2.11 mostra um diagrama tensão-temperatura e representa, de forma esquemática, as diferentes fases do SMA, que inclui a fase austenítica e as fases maclada e demacada da martensita, assim como as zonas de transição. Este diagrama é conhecido como diagrama de fase, sendo que cada composição de SMA terá seu diagrama correspondente.

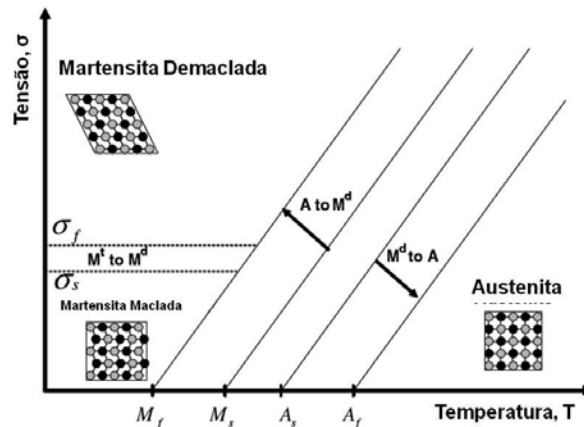


Figura 2.11: Diagrama de fase tensão-temperatura para um SMA (Lagoudas, 2008. Modificada).

Note que o diagrama da figura 2.11 é um caso especial do diagrama de fase metalúrgico citado no início desta seção, que envolve a composição como outra variável. Na construção de um diagrama de fase são envolvidas interpretações da resposta de um SMA submetido a vários carregamentos termomecânicos assim como as consequências dos comportamentos pseudoelástico

e de memória de forma. Esses dois comportamentos, SME e pseudoelasticidade, serão discutidos mais profundamente nas seções seguintes.

## 2.4 QUASIPLASTICIDADE

Considere uma amostra de SMA a uma temperatura inferior a  $M_f$ . Nesta temperatura e livre de tensões a liga existe em sua fase martensítica auto-acomodada ou maclada. Essa martensita maclada é caracterizada por uma estrutura formada por diferentes variantes de martensita, com diferentes orientações que podem ser até 24 e é formada pelo resfriamento da austenita livre de tensões.

Na Figura 2.12, considere a existência de apenas duas variantes. Com a aplicação de uma força trativa, será observada uma resposta elástica até que uma determinada tensão crítica  $\sigma_{crit}$  seja alcançada. Em seguida, quando a martensita auto-acomodada é submetida a uma tensão superior a  $\sigma_{crit}$ , observa-se a formação da martensita reorientada. O processo de reorientação da martensita maclada não envolve deformação plástica (Lagoudas, 2008). Após uma deformação relativamente grande, em algumas ligas pode chegar a 10%, o material volta a apresentar um comportamento elástico. Ao descarregar a amostra, a mesma manterá a sua deformação, representada por  $D_0$ , como uma deformação quasiplástica. Este comportamento é denominado quasiplasticidade.

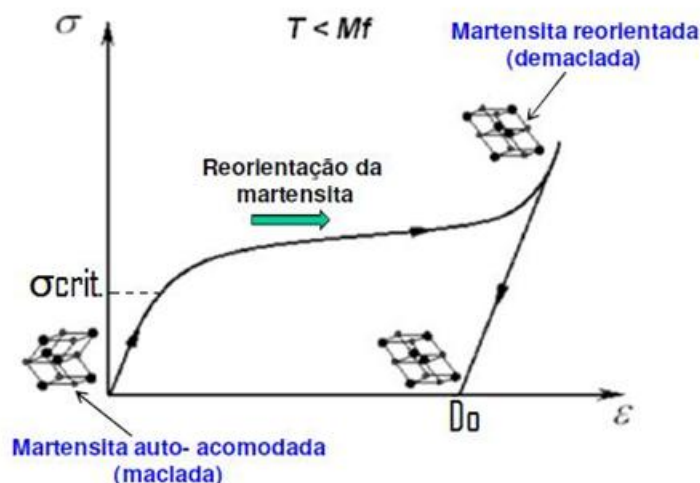


Figura 2.12: Fenômeno de quasiplasticidade em uma curva típica tensão-deformação.

## 2.5 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

As SMA apresentam o efeito memória de forma (SME) quando são carregados e deformados em sua fase martensítica maclada e, em seguida, descarregado. Um novo aquecimento a uma temperatura superior a  $A_f$  fará o SMA retomar sua forma original através da transformação de fase.

A natureza do SME pode ser melhor compreendido através do diagrama combinado tensão-deformação-temperatura da figura 2.13. Tal ilustração representa dados experimentais de um SMA de NiTi testado sob carregamento uniaxial. A tensão uniaxial devida à aplicação de carga é representada por  $\sigma$ . A deformação correspondente indicando uma variação de comprimento do material na direção do carregamento é representada por  $\epsilon$ .

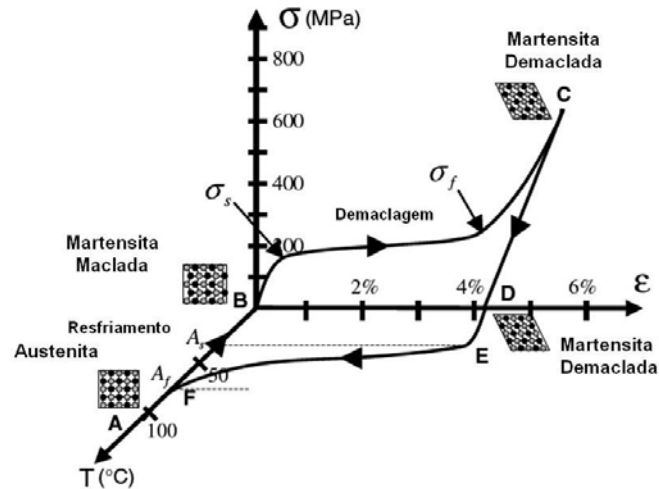


Figura 2.13: Diagrama tensão-deformação-temperatura para um SMA típico de NiTi (Lagoudas, 2008. Modificada).

Iniciando-se pela fase mãe (ponto A na figura 2.13), o resfriamento, sem carregamento, da austenita até temperaturas abaixo das temperaturas  $M_s$  e  $M_f$  resulta na formação de martensita maclada (ponto B). Quando a martensita maclada é submetida a uma tensão maior que a tensão inicial de deformação ( $\sigma_s$ ), o processo de reorientação é iniciado, resultando no crescimento de algumas variantes martensíticas que estão sob uma orientação favorável. O nível de tensão necessário para que ocorra a reorientação das variantes é bem menor que a tensão associada à deformação plástica permanente da martensita. O processo de demaclagem se completa a um nível de tensão  $\sigma_f$  que é caracterizado pelo fim do patamar superior no diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  na figura 2.13. O material é então descarregado de C para D, e o estado de martensita demaçada se mantém.

Submetido a um aquecimento, na ausência de carga aplicada, a transformação reversa se inicia quando a temperatura alcança  $A_s$ , (em E) e se completa quando alcança a temperatura  $A_f$  (ponto F), acima desta, apenas a fase mãe, austenítica, existe. Caso não tenha ocorrido nenhuma deformação plástica permanente gerada na demaclagem, a forma original do SMA será retomada, voltando-se ao ponto A. Sob um resfriamento subsequente, a martensita novamente retomará a fase de martensita maclada acomodada, com variantes sem variação de forma associada, e assim o ciclo de SME pode ser repetido.



O fenômeno descrito acima é chamado de SME de uma via, ou simplesmente SME, pois a recuperação de forma é atingida somente durante o aquecimento após o material ter sido demaclado por uma aplicação de carga.

## 2.6 PSEUDOELASTICIDADE

O comportamento pseudoelástico dos SMA está associado à transformação por tensão induzida, que acarreta na geração de deformação durante o carregamento e, em seguida, recuperação de forma quando descarregado a temperaturas superiores a  $A_f$ . O caminho de um carregamento termomecânico pseudoelástico geralmente se inicia em uma temperatura suficientemente alta onde existe austenita de forma estável. Em seguida, sob a aplicação de uma carga, se desenvolve até uma fase martensítica demaçada estável. E finalmente retorna para a fase austenítica quando o carregamento retorna a zero. Um exemplo deste caminho ( $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow a$ ) é ilustrado pela figura 2.14 como caminho 1. Normalmente, o teste pseudoelástico é realizado a uma temperatura nominal constante acima de  $A_f$ . O caminho do carregamento para tal teste é demonstrado como caminho 2 na figura 2.14.

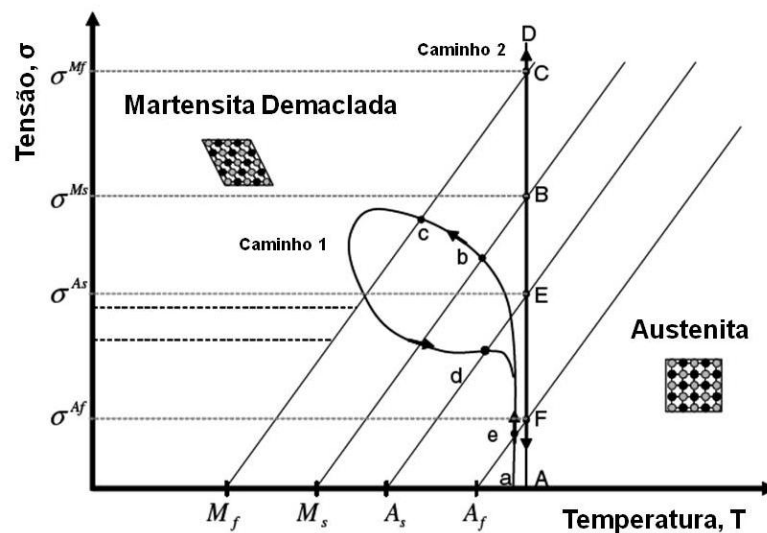


Figura 2.14: Diagrama de fase para dois possíveis carregamentos pseudoelásticos (Lagoudas, 2008. Modificada).

Para ilustrar com mais detalhes o comportamento pseudoelástico considere o caminho de um carregamento termomecânico ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$ ) na figura 2.14, que se inicia com tensão zero e a temperatura acima de  $A_f$ . O diagrama experimental  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondente a esse caminho é mostrado na figura 2.15. Quando um carregamento mecânico é aplicado, a fase mãe (austenita) sofre uma deformação elástica ( $A \rightarrow B$ ). Em um nível específico de tensão, o caminho do carregamento intersecciona a superfície inicial da transformação martensítica no diagrama de fase. Isso marca o nível de tensão ( $\sigma^{Ms}$ ) da transformação para martensita. Note-se que a transformação

induzida por tensão de austenita para martensita é acompanhada pela geração de deformações inelásticas como é mostrado no diagrama tensão-deformação da figura 2.15. A transformação procede (B→C) para o nível de tensão  $\sigma^{Mf}$  onde ocorre a interseção com a superfície de transformação  $M_f$ , indicando o final da transformação.

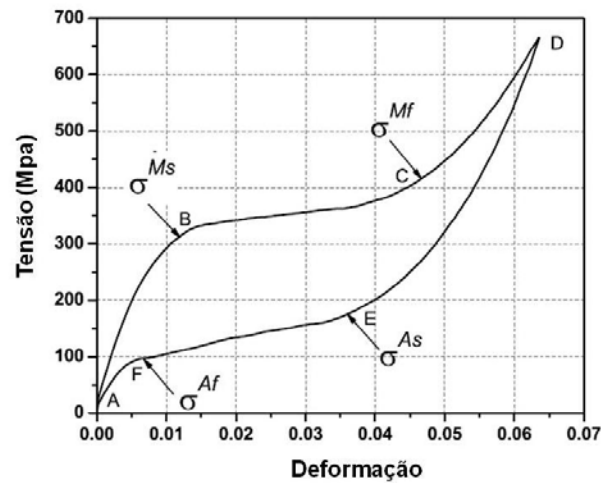


Figura 2.15: Típico ciclo de carregamento pseudoelástico de um SMA (Lagoudas, 2008. Modificada).

O fim da transformação martensítica é indicado pela mudança distinta na curva  $\sigma$ - $\epsilon$ , que está associada ao carregamento elástico da fase martensítica. Um aumento subsequente do carregamento não causa nenhuma outra transformação e ocorre apenas a deformação elástica da martensita demacrada (C→D). Quando o carregamento é retirado gradualmente, a martensita é descarregada elasticamente (D→E). No ponto E, o caminho do descarregamento intersecciona o ponto de início da superfície austenítica (em  $\sigma^{As}$ ), o que causa a reversão da martensita em austenita. O processo é acompanhado pela recuperação de forma devido à transformação de fase. O fim da transformação de volta à austenita é identificado pelo ponto onde a curva de descarregamento se junta à região elástica da austenita (ponto F, correspondente a tensão  $\sigma^{Af}$ ). O material então retoma à posição A elasticamente. As transformações de fase inicial e reversa, durante um ciclo pseudoelástico completo, resultam em uma histerese, a qual, no diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$ , representa uma energia dissipada no ciclo de transformação. Os níveis de tensão de transformação e o tamanho da histerese dependem do SMA (Lagoudas, 2008).

## 2.7 HISTÓRICO E APLICAÇÕES

A descoberta da martensita em aços nos anos 1890 por Adolf Martens foi um grande passo para o eventual descobrimento dos materiais com memória de forma. A transformação martensítica talvez tenha sido o fenômeno metalúrgico mais estudado no começo dos anos 1900. Tal transformação, como observada nos sistemas FeC, foi determinada como irreversível. O conceito de transformação martensítica termoelástica, que explicou a reversibilidade da

transformação martensítica, só foi introduzido por Kurdjumov e Khandros (1949), baseado em observações experimentais da estrutura martensítica termicamente reversível de ligas CuZn e CuAl. Em 1953, a ocorrência de transformações martensíticas termoelástica foi demonstrado em outras ligas, tais quais InTi e CuZn.

A transformação martensítica reversível, e as ligas que possuíam tal comportamento não tiveram finalidade até 1963. A introdução em aplicações na engenharia ocorreu com a descoberta do NiTi por Buehler (1963) enquanto pesquisava materiais para serem utilizados como escudo térmico. Percebeu-se que além das suas boas propriedades mecânicas, o material também possuía uma capacidade de recuperar sua forma. Para esta observação, o termo “NiTiNOL” foi criado para esse material em homenagem a sua descoberta no Naval Ordnance Laboratory (NOL). O termo efeito de memória de forma (SME) foi dado ao comportamento associado à recuperação de forma. O descobrimento do Nitinol iniciou o interesse ativo de pesquisas sobre SMA. Os efeitos de tratamento térmico, composição e microestrutura de materiais foram amplamente investigados e começaram a ser entendidos neste período.

Em 1965, estudos mostraram que a adição de um terceiro elemento em ligas, como Co ou Fe, no sistema NiTi causava uma redução drástica nas temperaturas de transformação do SMA. O novo composto de ligas inspirou a primeira aplicação comercial de SMA, conhecida como *Cryofit*, onde o material era usado em acoplamentos de tubos nos aviões caça F-14. As temperaturas de transformação dos *Cryofit* eram tão baixas que, para prevenção de sua ação antes da montagem, os acoplamentos de tubos eram transportados em nitrogênio líquido.

A continuidade das pesquisas no assunto levaram ao desenvolvimento do NiTiNb, em 1989, que era facilmente manuseado devido a sua larga temperatura de histerese, e encontrou muitas aplicações em reparos de aeronaves de batalhas e reatores nucleares. SMA de alta temperatura, como TiPd, TiPt e TiAu (com temperatura de transformação acima de 100°C), também foram desenvolvidos no começo dos anos 1970. Na mesma época, em 1978, enquanto estudavam as propriedades de fadiga do NiTi, Melton e Mercier (1978) mostraram que a introdução de Cu nas ligas não alterava consideravelmente as temperaturas de transformação, porém, estreitava a tensão de histerese. Mais tarde, em 1986, Miyazaki (1986) demonstrou uma melhora na resistência a fadiga para ligas NiTiCu. Esse aumento da vida da liga associado ao seu baixo custo tornou-o adequado para uma ampla variedade de aplicações na engenharia.

Desde a descoberta do Nitinol em 1963, muitas aplicações comerciais foram desenvolvidas. Durante os anos setenta, surgiram diversas aplicações da liga NiTi na biomedicina, mas foi nos anos noventa que as ligas realmente invadiram o mercado. Nesta época, os SMA foram aplicados em ventiladores de ar condicionado, conectores de cabos eletrônicos, válvulas e uma variedade de outros produtos. Além disso, durante a última década, a demanda por atuação em condições de operação de alta temperatura necessária nas indústrias aeroespacial e do petróleo, reavivou um

grande interesse no desenvolvimento de HTSMA (*high temperature SMA*). Finalmente, ligas que demonstram características de mudança de forma similares as da SMA, mas através da influência de um campo magnético também estão sendo pesquisadas atualmente. As altas frequências de atuação e as grandes tensões geradas nos SMA magnéticos (MSMA – *magnetic SMA*) fazem desse material um forte candidato para atuar em dispositivos de alta frequência. No tópico seguinte serão descritas muitas destas aplicações citadas.

A implementação da tecnologia de materiais de memória de forma na indústria aeroespacial expandiu as possibilidades das superfícies de comando, dos sistemas de propulsão e dos veículos espaciais, e o progresso em trabalhos nesta área é contínuo. Algumas das aplicações e pesquisas mais recentes do potencial dos SMA aplicados nestas áreas estão nas áreas de superfícies de comando e sistemas propulsores.

Dois dos programas mais conhecidos que promovem a utilização de SMA em superfícies de comando de aeronaves são o *Smart Wing Program* e o *Smart Aircraft and Marine Propulsion System* (SAMPSON) (Sanders et al, 2004). O primeiro representou uma colaboração entre DARPA, AFRL e Northrop Grumman, e seu propósito era implementar materiais ativos para otimizar o desempenho das partes móveis das aeronaves (Kudva, 2004). Nesse programa, fios tensores de SMA foram usados para atuar em ailerons sem articulação, e compunham também os tubos de torque que iniciavam o movimento de expansão das asas do F-18. Contudo, apesar de comprovadamente bem sucedido na escala 1:16, esta aplicação se provou insuficientemente forte para atuar em escala real. As imagens da figura 2.16, mostram a superfície de comando e o tubo de torque testados.

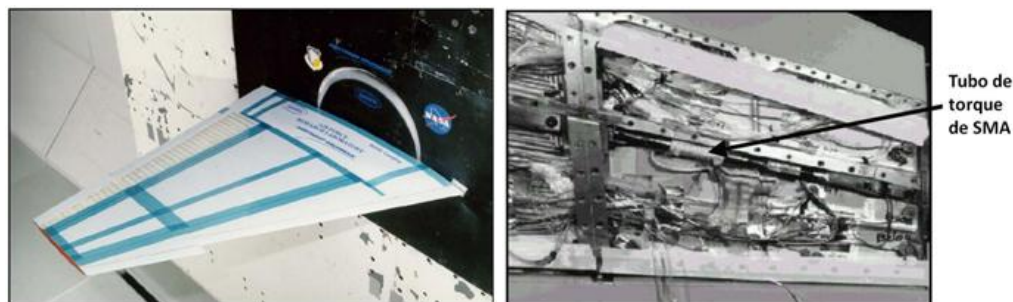


Figura 2.16: Modelo de asa do programa SMART e vista em corte dos tubos de torque utilizados (Lagoudas, 2008).

Inúmeros esforços foram feitos para integrar elementos de SMA em estruturas aeronáuticas. Um dos estudos levou ao desenvolvimento de um aerofólio de geometria variável. Através da atuação do SMA, este aerofólio mudava efetivamente sua configuração simétrica para envergada (Strelec et al, 2003). Outros estudos, ainda nesta área, focaram-se em elementos menores de atuação, já que os SMA são capazes de atuar em uma vasta faixa de tamanhos. Uma pesquisa

avaliou a possibilidade de junção de SMA a sistemas micro-eleto-mecânicos (MEM) para diminuir do arrasto causado pela turbulência nas superfícies aerodinâmicas (Mani et al, 2003). Quando acionado adequadamente, a superfície de MEM cria ondas que energizam a camada laminar do deslocamento do fluido e, dessa forma, minimizam a força do escoamento turbulento.

Muitos estudos também foram feitos tentando-se otimizar as propriedades dinâmicas de painéis estruturais promovendo uma variação na rigidez através da transformação martensítica. Foi verificado que a deflexão pós-flambagem, induzida termicamente em uma estrutura, podia ser diminuída através de uma pré-deformação do SMA ou pelo aumento da fração volumétrica de suas fibras (Tawfik et al, 2002). A concepção de um SMA modificável, o *smart spar* (longarina inteligente), também representou mais uma tentativa de alteração das propriedades dinâmicas (Nam et al, 2002).

A utilidade de materiais ativos na construção de sistemas de propulsão foi demonstrada pelo programa SAMPSON (Pitt et al, 2001). Uma das utilidades do SMA neste programa era alterar a geometria das tomadas de ar do motor de um F-15. Este experimento foi realizado em escala real, e sua montagem pode ser vista na figura 2.17. Uma força total aproximada de 24700N foi alcançada utilizando-se o SMA. Essa força gerada rotacionava a entrada de ar em 9°.



Figura 2.17: Tomada de ar do F-15 do programa SAMPSON em ensaio no túnel de vento da NASA (Lagoudas, 2008).

Os regulamentos mundiais quanto aos níveis de ruído durante pousos e decolagens se tornaram mais restritos nos últimos anos. Para reduzir tal ruído, muitos designers desenharam uma nova configuração na saída da nacela das turbinas dos aviões, são ondulações chamadas de *chevron*. Este novo desenho causa uma perturbação nos gases de escape da turbina reduzindo o seu nível de ruído. Pesquisadores estão estudando métodos de inserir pequenos pedaços de SMA embutidos nos *chevrans*. Com a atuação destes, em voos de baixa velocidade ou baixa altitude, os *chevrans* ficam levemente envergados e perturbam ainda mais o fluxo dos gases de escape, aumentando seu

efeito. Já em voos de grande altitude ou alta velocidade, os SMA inseridos são resfriados até sua forma martensítica deixando os *chevrons* mais aplainados diminuindo sua perturbação e aumentando assim o desempenho da turbina (Mabe et al, 2005). Na figura 2.18 pode-se ver a configuração dos *chevrons* de geometria variável utilizados pela Boeing.

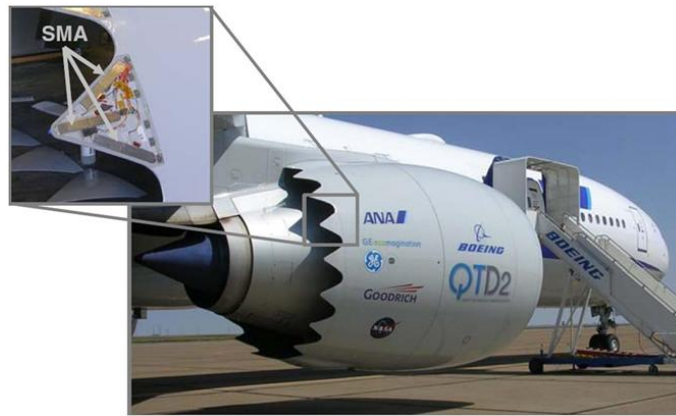


Figura 2.18: Ensaio em voo dos chevrons de geometria variável da Boeing (Lagoudas, 2008).

Uma solução ainda mais sofisticada aplicada aos *chevrons* foi proposta pela NASA. Neste projeto, tiras de SMA eram instaladas nas superfícies interna e externa dos *chevrons* durante seu processo de fabricação (Turner et al, 2006). Quando aquecido, o SMA se contraía alternadamente, gerando um momento fletor nos *chevrons* e aumentando ainda mais a capacidade destes de perturbar o fluxo dos gases de escape.

Nos sistemas de propulsão de aeronaves o papel dos SMA focou-se principalmente no rotor ou nas palhetas da turbina. Uma pesquisa atual estuda a ação do SMA em lâminas moveis do rotor. Os SMA são bem aplicáveis nesta função por terem boa aplicabilidade em pequenos espaços. Um estudo propõe o uso de tubos de torque de SMA que exercem uma torção nas lâminas do rotor de aviões do tipo *tiltrotor*, que possuem turbinas inclináveis, podendo fazer pousos ou voos verticais (Jacot et al, 2006). Quando atuam, esses SMA auxiliam as diferentes configurações de voo destes aviões, diferenciando a configuração das palhetas da turbina, melhorando assim o desempenho do voo tanto vertical quanto horizontal.

Os SMA estão sendo usados em aplicações espaciais para auxiliar soluções de atuação no vácuo espacial e também para melhorar o amortecimento das vibrações existentes nos lançamentos dos veículos espaciais. A maioria das aplicações e dos sistemas são desenvolvidos e ensaiados cuidadosamente. Muitos esforços foram feitos para minimizar as vibrações de lançamentos, principalmente devido ao aumento dos lançamentos de satélites. Até 1984, estimava-se que 14% das missões espaciais apresentavam falhas devido a choques no lançamento, resultando, em alguns casos no abandono da missão. Tais choques eram devidos à pirotecnia dos mecanismos de lançamento. Os SMA conseguiam graduar o aquecimento em sua atuação tornando-os muito úteis

para constituir mecanismos de lançamento de baixo choque. O fator de escala dos SMA, novamente contribuiu para sua aplicação espacial em dispositivos de lançamento de satélites cada vez menores. Exemplos conhecidos foram o *Qwknut* e o *MicroSepNut*. Outro dispositivo em miniatura, com dimensão de apenas 5 mm, promovia uma rotação de 90° no dispositivo de lançamento pela atuação do SMA.

Na medicina, uma interessante aplicação do SMA consiste em um filtro de coágulos sanguíneos desenvolvido por Simon. É um fio de NiTi que é previamente deformado para assumir uma forma que lhe permita fixar-se às paredes internas das veias. Esse filtro é deformado à baixa temperatura, de modo a poder ser inserido na veia pretendida junto com uma solução salina que o mantém resfriado. Ao ser submetido ao calor do corpo humano, ele retoma a configuração original, conforme a figura 2.19 (Machado & Savi, 2002).

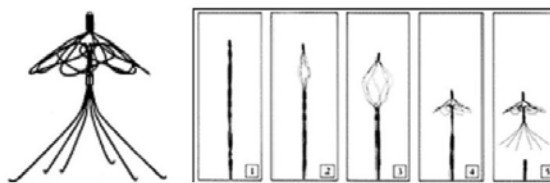


Figura 2.19: Filtro de Simon - evolução de sua forma durante o aquecimento (Fernandes, 2003).

Também na área médica pode-se citar os implantes de placas ósseas no regime pseudoelástico que auxiliam a recuperação de um osso quebrado ou fraturado, veja a figura 2.20. Frequentemente são usadas em fraturas ocorridas na face, como nariz, mandíbulas e na região óssea ocular. Essa técnica é conhecida na medicina como síntese óssea. As placas facilitam a cura dos ossos fraturados que necessitam estar constantemente sobre compressão. Tal compressão é obtida por implante ósseo, normalmente fabricado em titânio e aço inoxidável, que mantém os ossos juntos e acelera a recuperação do osso fraturado (Mantovani, 2000). Após alguns dias de recuperação, a compressão provida pelo implante sofre uma redução na intensidade, pois, conforme se dá a cura, as duas partes do osso fraturado tendem a ficar mais próximas. Com aumento da proximidade entre as partes, há um afrouxamento do implante previamente fixado, aumentando a velocidade de recuperação. Essas placas ósseas são fabricadas em níquel-titânio com efeito de memória de forma. Usando uma liga de NiTi que possui efeito de memória de forma acima de 15 °C, os cirurgiões seguem o mesmo procedimento usado com implantes convencionais. Primeiramente a placa de NiTi é resfriada abaixo da sua temperatura de transformação e, então, implantada no osso. Porém, com o aquecimento natural do corpo humano, a SMA contrai e com isso gera uma compressão nos ossos fraturados, melhorando o processo de cura se comparado a uma placa comum de titânio ou aço inoxidável. Esta pressão contínua auxilia no processo de cura e reduz o tempo de recuperação (Mantovani, 2000). Existem ainda muitos aspectos a serem estudados antes

de se utilizarem efetivamente as SMA como implantes. Neste último exemplo o grande desafio para os engenheiros é o desenvolvimento de placas que aplicam a pressão correta nas fraturas.

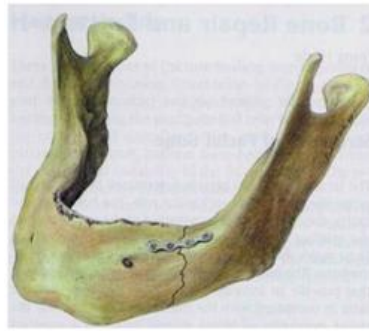


Figura 2.20: Implante de placa óssea utilizada para reparar uma fratura na mandíbula (Castilho et al, 2011).

Em 1975, Andreasen, da Universidade de Iowa, fez o primeiro implante de um dispositivo ortodôntico explorando a pseudoelasticidade de uma SMA para correção da posição dos dentes (Hodgson et al, 1990). Esta correção é imposta através de uma pequena variação de tensão quase constante que resulta em grande deformação, tomando como parâmetro os materiais convencionais. Consequentemente, o incômodo é mínimo para o paciente. A grande vantagem do NiTi é o fato de permitir deformações de cerca de 8 a 10% sem entrar no regime plástico, explorando o fenômeno da pseudoelasticidade. É possível ainda conciliar este efeito, com a transformação de fase imposta pela temperatura (Machado & Savi, 2002). A figura 2.21 ilustra tal aplicação.



Figura 2.21: Arcos ortodônticos de SMA (Fernandes, 2003).

## 2.8 CONVERSÃO TERMOMECÂNICA DE ENERGIA VIA SMA

Este capítulo apresenta alguns trabalhos que foram realizados sobre máquinas térmicas que utilizam materiais com memória de forma (SMA). Máquinas térmicas são equipamentos capazes de converter energia térmica em trabalho mecânico. Como já mencionado, só nos Estados Unidos



da América existem cerca de nove diferentes máquinas térmicas de SMA, todas patenteadas (Wakjira, 2001).

O primeiro trabalho citado, de 1973, foi realizado por Ridgway M. Banks no laboratório da Universidade da Califórnia (*Lawrence Berkely Laboratory*). Ele inventou o primeiro motor de operação contínua que utiliza SMA, enchendo metade de um pequeno cilindro com água quente e a outra metade com água fria e inserindo nesse cilindro, uma roda de aros que continha 20 fios de NiTi. Os fios foram fixados de forma excêntrica de tal maneira que para realizar uma rotação deveriam ser alongados durante o giro. Essa roda de aros de SMA girava dentro do cilindro passando pelas águas quente e fria. Quando passava pela água quente, o NiTi retomava sua forma e causava uma força radial que fazia a roda girar. Em seguida, passando pela água fria, os fios de NiTi podiam ser alongados, possibilitando uma nova contração quando chegasse mais uma vez ao lado quente. A roda então girava continuamente promovendo uma rotação de 70 RPM e gerando meio watt de energia elétrica. Veja na figura 2.22 o mecanismo construído por Banks.

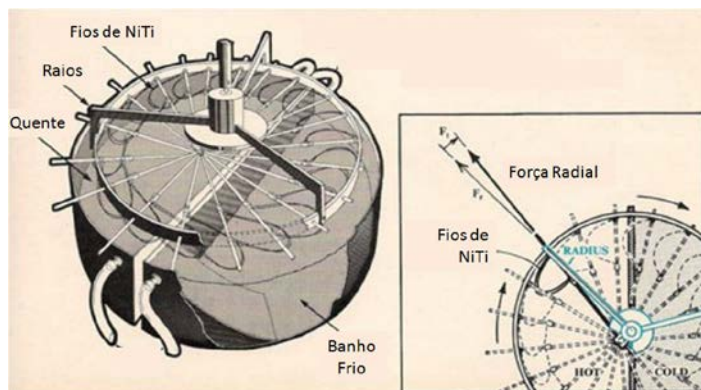


Figura 2.22: máquina térmica construída por Ridgway Banks (1975).

Esse dispositivo operou por mais de 23 milhões de ciclos com seus fios originais intactos. No entanto, por não apresentar apenas a deformação uniaxial desejada, e também por sofrer perdas mecânicas e térmicas substanciais devido ao atrito hidro-dinâmico (Johnson 1975), tal dispositivo possuía uma eficiência muito baixa.

Outro trabalho foi feito por Alfred Davis Johnson em 1976. Ele construiu dois tipos de motores que podem ser vistos na figura 2.23.

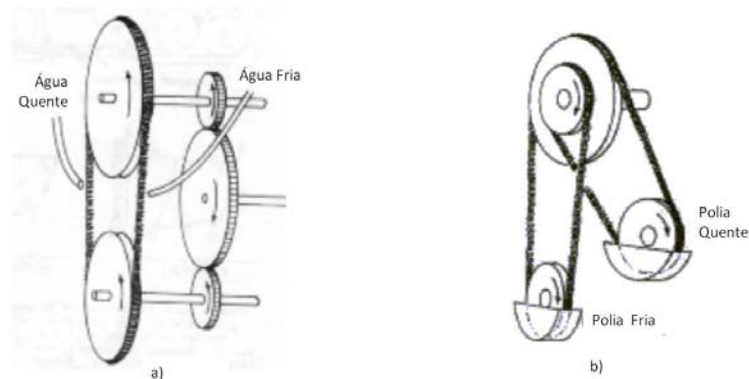


Figura 2.23: a) motor de nitinol em forma de hélice contínua, sincronizada por engrenagens. b) forma modificada do motor “a”, aqui duas polias de tamanhos diferentes sincronizam a rotação da engrenagem (Wakjira, 2001. Modificada).

Na figura 2.23a, uma correia dentada de SMA está montada sobre duas polias de tamanhos diferentes que giram no mesmo sentido, e à mesma velocidade angular por estarem associadas a um conjunto de engrenagens que sincroniza seu movimento. A correia é submetida, de um lado a um resfriamento onde pode sofrer uma deformação. Em seguida, do outro lado, ela é submetida a um aquecimento que ativa sua memória de forma fazendo-a contrair. A diferença de tensão entre as duas etapas do ciclo, resulta em um torque aplicado na polia de maior diâmetro do engrenamento, gerando assim uma saída de potência.

Já no mecanismo da figura 2.23b, as polias são montadas de tal maneira que a correia movimentava uma única polia de transmissão. As outras duas polias apenas submetem a correia ao aquecimento e resfriamento necessários para movimentar a máquina.

Outro trabalho mencionado, de princípio similar ao de Johnson foi a máquina construída por John J. Pachter (1979). Ele utilizou duas correias de SMA que giravam dois sistemas de polias associados entre si por eixos. A figura 2.24 mostra um esquema do mecanismo.

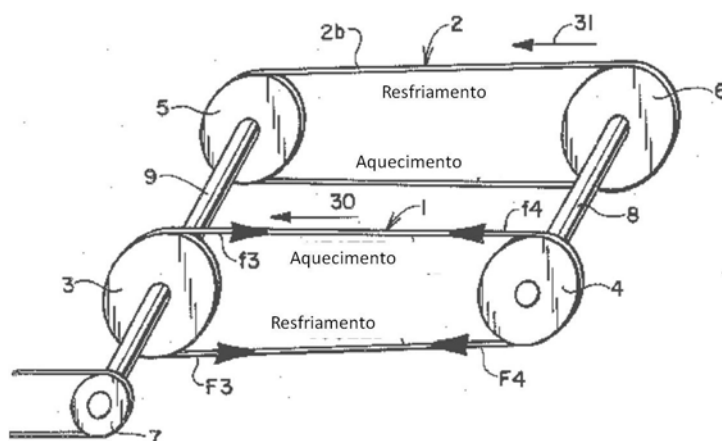


Figura 2.24: Representação simplificada da máquina construída por Pachter (1979. Modificada).

Os aquecimento e resfriamento invertidos das correias faziam os dois sistemas de polias girarem no mesmo sentido, gerando assim uma potência de eixo que era transmitida a uma finalidade externa por uma pequena polia. A existência de dois conjuntos de polias e correias trabalhando de forma alternada gerava uma rotação contínua no mecanismo. No entanto, a necessidade da utilização de correias de deslizamento no sistema diminuía bastante sua eficiência.

Um quarto trabalho, bem mais recente, que se baseia nos principais princípios envolvidos descritos anteriormente foi a tese desenvolvida por Jilcha Fekadu Wakjira (2001). Wakjira construiu um sistema de engrenamento por corrente e coroa, mas diferentemente do usual neste tipo de sistema de transmissão, ao invés de um eixo transmitir potência a outro eixo pela corrente, a própria corrente, feita de SMA, é a responsável pelo movimento das coroas, e logo dos eixos. O autor utilizou uma corrente feita com fios de um SMA conhecido por flexinol, e coroas de plástico com diâmetros diferentes. Novamente, assim como no trabalho de Johnson, a corrente passa por um tanque de água quente fazendo-a ser tracionada e esticada em cerca de 2% de seu comprimento original. Na outra etapa do ciclo, a corrente sobre um resfriamento que a faz contrair (também em 2%), e isso faz com que ela exerça um torque que tende a girar o sistema em um sentido. A imagem abaixo mostra um desenho do mecanismo.

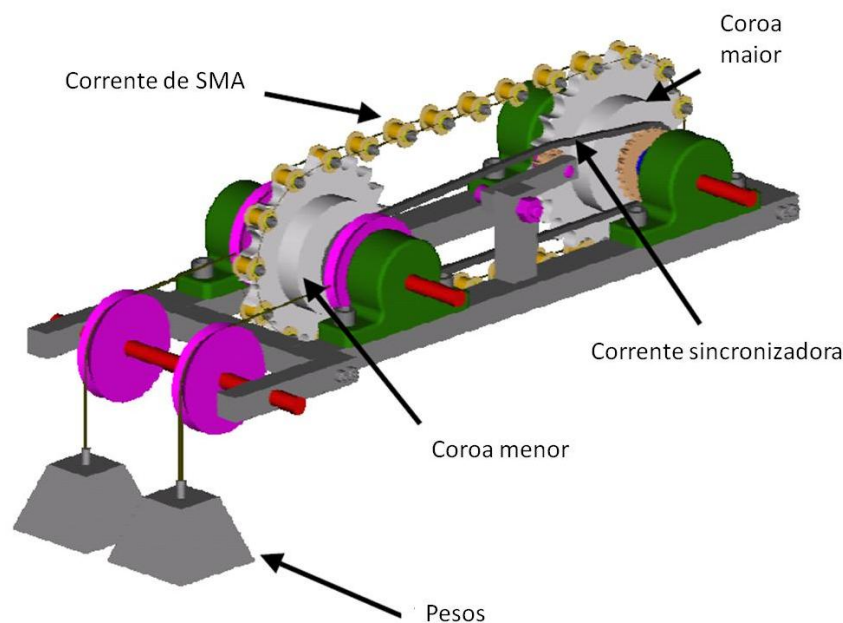


Figura 2.25: Representação em CAD do projeto de Wakjira (2001. Modificada).

A corrente sincronizadora tem a função de fazer com que os dois eixos girem à mesma rotação, já que isso não aconteceria naturalmente devido a diferença de tamanho das duas coroas. Já os pesos, exercem uma carga sobre a corrente através de um eixo móvel, para ativar a tração da mesma.

Além da montagem de mecanismos, muitos pesquisadores dedicaram seus estudos na formulação de equações para descrever e simular o movimento de tais mecanismos. Também no ano de 2001, Zhu et al (2001) apresentaram um modelo teórico para simulação de máquinas térmicas de SMA. Primeiramente, eles derivaram um modelo mecânico para SMA, em seguida, simplificaram este modelo para aplicação em uma análise real, e finalmente integraram o modelo simplificado focando em uma análise da conversão de energia em um motor de SMA.

Ainda no mesmo ano, os mesmo autores utilizaram o modelo que construíram para simular o comportamento de uma máquina real de SMA. Eles ensaiaram e simularam o comportamento da máquina térmica construída por Iwanaga et al (1988). Esta máquina, mostrada esquematicamente na figura 2.26, atua pela utilização de molas helicoidais de NiTi.

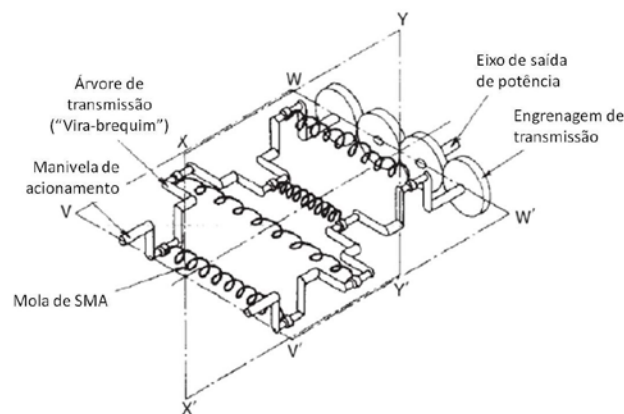


Figura 2.26: Diagrama esquemático da máquina proposta por Iwanaga (1988. Modificada).

O princípio para operação desta máquina consiste no movimento da árvore de transmissão (“virabrequim”) associado à compressão e tração das molas. Quando o movimento do virabrequim leva as molas para a posição mais baixa do sistema, esta fica submersa em um tanque de água quente que atua no material de memória de forma iniciando seu ciclo. Na posição mais alta, o SMA das molas sofre o resfriamento.

A comparação entre o experimento de Iwanaga (1988) e a simulação de Zhu (2001) foi bastante promissora. Zhu obteve resultados geralmente consistentes aos que Iwanaga reportou anteriormente, com diferenças bem menores a “uma ordem de grandeza”, como disse Funakubo (1987).

### 3 ANÁLISE DA MÁQUINA DE GLASAUER

O comportamento dos materiais de memória de forma já foi amplamente estudado e caracterizado. Em seções anteriores deste trabalho foram apresentadas muitas aplicações diretas e também máquinas térmicas capazes de produzir trabalho a partir desse comportamento dos SMA. A maneira como este trabalho realizado pelo material pode ser aproveitado dependerá então do mecanismo construído para tal fim.

Aproveitando-se então, das propriedades especiais dos materiais de memória de forma, das experiências anteriores e de suas próprias ideias, Franz-Uwe Glasauer (1996), em sua tese de doutorado de 1996, desenvolveu uma máquina térmica bastante interessante que transforma o movimento axial de tração e compressão de fios de SMA em potência de eixo. Esta máquina será descrita e detalhada nas seções que seguem.

#### 3.1 CICLO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA BASEADA EM SMA

Para o melhor entendimento do mecanismo de Glasauer, primeiramente deve-se entender o ciclo termodinâmico envolvido em uma máquina térmica baseada no comportamento termomecânico das SMA. A figura 3.1 mostra um diagrama carga-deformação que ilustra os comportamentos típicos das SMA abaixo de  $M_f$  e acima de  $A_f$ .

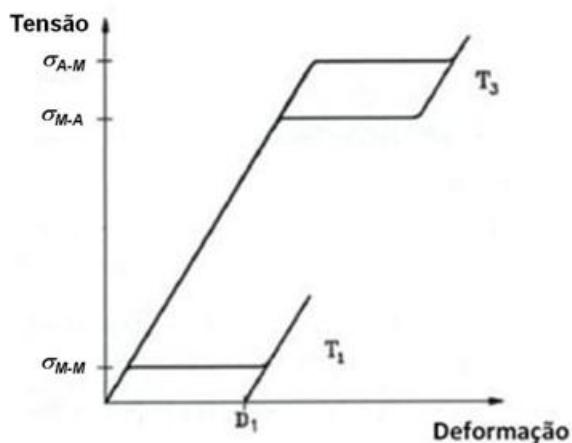


Figura 3.1: Diagrama tensão-deformação de um SMA (Glasauer, 1996. Modificada).

Neste diagrama podem ser identificadas uma tensão correspondente ao fenômeno da quasiplasticidade (curva inferior), e duas outras correspondentes ao fenômeno da pseudoelasticidade. Para o primeiro fenômeno, a tensão de reorientação da martensita maclada ( $\sigma_{M-M}$ ) indica o caminho de uma deformação (por aplicação de carga) que o material percorre em uma temperatura  $T_1$  baixa, ou seja, com o material na fase martensítica ( $T_1 < M_s$ ). Já o segundo

fenômeno está caracterizado por duas tensões, uma tensão de carregamento ( $\sigma_{A-M}$ ) e outra de descarregamento ( $\sigma_{M-A}$ ). No carregamento pseudoelástico o material em uma temperatura  $T_3$  acima de  $A_f$ , ou seja, na fase austenítica, passa para a fase martensita demaçada. Quando descarregado, o SMA retorna à fase austenítica ainda à temperatura  $T_3$ .

O mecanismo de Glasauer, assim como muitas das máquinas térmicas citadas neste trabalho, explora os efeitos indicados no diagrama da figura 3.1 para obter trabalho mecânico produzido pelo SMA. A figura 3.2 mostra, também em um diagrama carga-deformação, como este trabalho mecânico será então obtido.

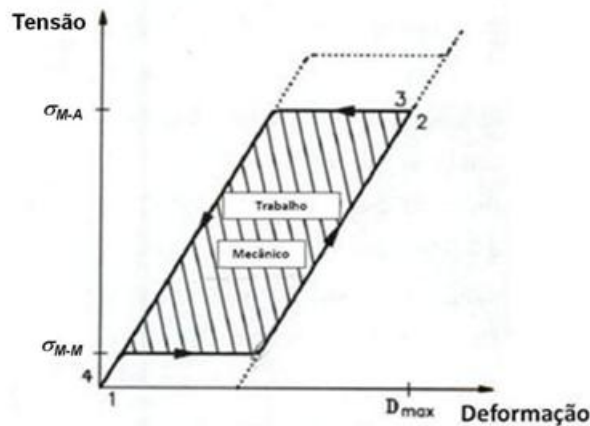


Figura 3.2: Diagrama tensão-deformação para o ciclo termomecânico de uma máquina baseada em SMA (Glasauer, 1996. Modificada).

No trecho indicado entre os pontos 1 e 2 do diagrama, o material de memória de forma se encontra no lado frio do sistema em sua fase martensítica. O material é então deformado pela ação de uma força externa, no caso da máquina de Glasauer, molas são responsáveis por tal esforço. A aplicação dessa força no material reorienta a fase martensítica fazendo-a passar de martensita maclada para martensita demaçada. O carregamento é elevado, em um processo isotérmico, até uma carga equivalente ao descarregamento do material à uma temperatura  $T_3$  (sendo  $T_3 > A_f$ ).

A passagem do ponto 2 para o ponto 3 indica a passagem do SMA do lado frio da máquina para o lado quente. Com o seu aquecimento até uma temperatura  $T_3$  maior que  $A_f$ , ocorre a transformação da fase martensita demaçada (material está deformado) para austenita. Este processo é isocórico já que neste momento do ciclo não há variação do carregamento.

O trecho seguinte, do ponto 3 ao 4, indica a recuperação da forma do material em sua fase austenítica. Como indicado, o carregamento externo diminui até chegar ao mesmo nível de carregamento do início do ciclo. Novamente este processo é isotérmico, e ocorre à temperatura  $T_3$  indicada.

Finalmente, a passagem do ponto 1 para o 4 indica o retorno do SMA para o lado frio do sistema, já com sua forma original, ele muda novamente da fase austenítica para martensita maclada, podendo assim ser deformado mais uma vez reiniciando o ciclo.

Visualizando-se esse ciclo em um diagrama  $\varepsilon$ - $T$ , vê-se o que se segue na figura 3.3, os pontos indicados de 1 a 4 são os estados equivalentes aos pontos do diagrama 3.2.

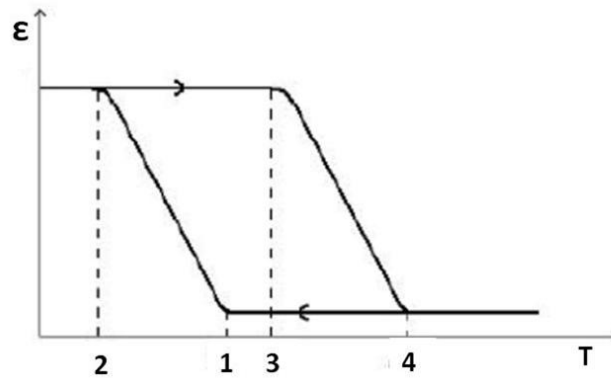


Figura 3.3: Ciclo termomecânico com SMA no diagrama  $\varepsilon$ - $T$ .

A área interna formada no diagrama 3.2 indica o trabalho mecânico que esse sistema poderia realizar. Note-se que, esta área é composta pela diferença entre a área abaixo da curva de retorno do material (trabalho realizado pelo SMA) e a área abaixo da curva de deformação do mesmo (trabalho inserido no sistema). No entanto, este diagrama indica um ciclo ideal, sem perdas, associado ao ciclo térmico de um mecanismo com SMA. Na prática, essa área é reduzida devido a algumas ineficiências e limites que podem ser alcançados na concepção de uma máquina.

Primeiramente, deve-se notar que, quando o material de memória de forma entra no lado frio do ciclo, sua deformação, é causada por uma força externa. Esta força tem que ser inserida no sistema, ou seja, quanto maior seu valor, maior é o trabalho gasto no andamento do ciclo. Sendo assim, na prática, aquela deformação máxima ( $D_{max}$ ) apontada no diagrama da figura 3.2 não será alcançado. Materializando este pensamento no equipamento de Glasauer, significa que uma força além da exercida pela mola teria que ser aplicada no SMA para deformá-lo até aquele nível. O diagrama da figura 3.4 a seguir mostra como a curva do ciclo pode se aproximar da realidade admitindo essa consideração.

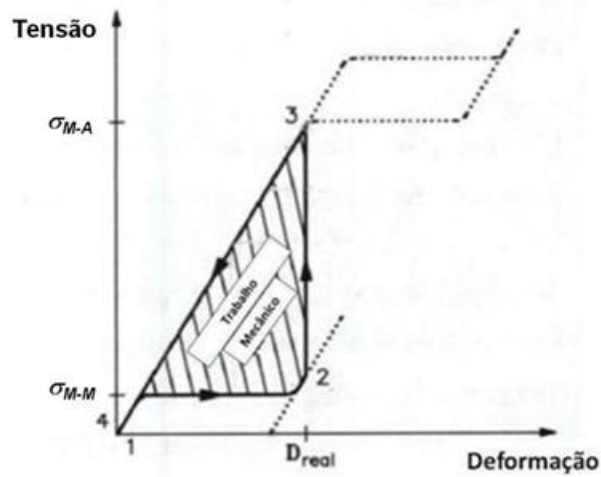


Figura 3.4: Diagrama tensão-deformação considerando o esforço externo real inserido na máquina (Glasauer, 1996. Modificada).

Além disso, assim como na transição para o lado frio, no retorno ao lado quente do sistema deve-se considerar que o material não chega a passar totalmente de sua fase martensítica para austenita antes de ser descarregado, ou seja, ele começa a curva de descarregamento ( $\sigma_{M-A}$ ) em uma temperatura  $T_2$  inferior à temperatura  $T_3$  indicada nos diagramas anteriores. Isso se deve a uma ineficiência da transferência de calor ao SMA e também ao fato de que o mecanismo de esforço externo, no caso de Glasauer a mola, não deixa de atuar até que transformação de fase seja completamente realizada. Logo, na realidade ocorre mais uma redução na área do ciclo como é mostrado no diagrama da figura 3.5.

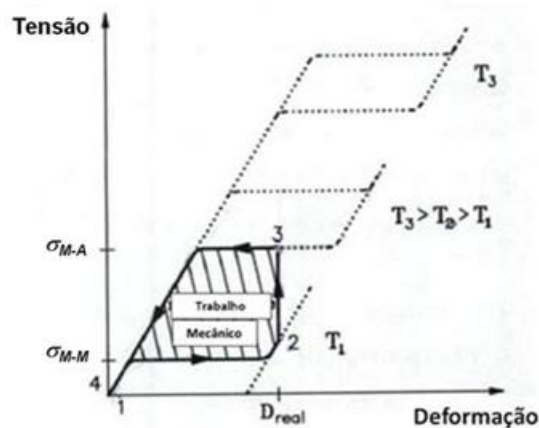


Figura 3.5: Diagrama real tensão-deformação (Glasauer, 1996. Modificada).



### 3.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE GLASAUER

Entendido o ciclo termodinâmico de uma máquina que utiliza material de memória de forma, uma avaliação mais clara do mecanismo proposto por Glasauer pode ser realizado. Seu equipamento é composto por um eixo rotativo acoplado a dois flanges. Ao redor deste eixo principal, fixados aos flanges, existem fios de NiTi, um material de memória de forma bastante conhecido. Em um dos flanges, os fios de SMA são fixados a pequenas molas. Do outro lado do eixo, o flange possui uma inclinação em relação ao eixo rotativo. A figura 3.6 mostra esquematicamente o mecanismo, e a partir dela será mais simples o entendimento do processo.

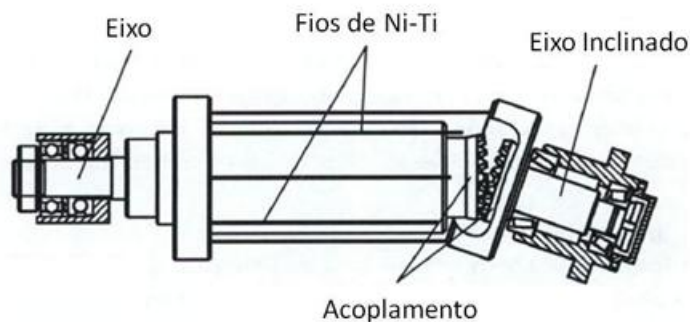


Figura 3.6: Mecanismo de conversão axial-rotacional de Glasauer (Glasauer, 1996. Modificada).

O eixo principal possui diâmetro de 70 mm. O autor realizou ensaios montando o equipamento ora com 12, ora com 24 fios de NiTi. Estes fios possuem diâmetro de 1,3 mm e comprimento de 400 mm. O flange do eixo inclinado possui uma angulação  $\alpha=19^\circ$  em relação ao eixo vertical. O carregamento do sistema varia entre 400 e 800 N de força. Um detalhamento das partes componentes do sistema com vistas superior e lateral, vistas em corte e vistas detalhadas pode ser examinado no ANEXO I deste trabalho.

O funcionamento da máquina ocorre devido a três fatores fundamentais: a força das molas de um lado, o comportamento dos fios de NiTi que são submetidos a um aquecimento e resfriamento cíclico, e à inclinação do flange oposto.

O início do processo exige uma ação externa, e por isso, acoplado ao eixo linear da máquina existe um volante de acionamento. Após iniciado o movimento, os fios de SMA passam por um recipiente que contém óleo quente e passam da fase martensítica para austenita, recuperando sua forma original sem deformação e exercendo assim uma força de tração no sistema. O recipiente quente do sistema é irrigado por uma bomba de óleo do tipo parafuso com uma vazão constante de 20 L/min que mantém a temperatura em aproximadamente 85°C.

Quando passam para o recipiente de óleo frio, os fios são resfriados voltando a sua fase martensítica. Este recipiente é irrigado por duas bombas centrífugas com vazão máxima de 40 L/min. A temperatura fria do óleo é de 25°C. Na fase martensítica, a força exercida pelas molas

fixadas nas extremidades dos fios, juntamente a ação da tração exercida pela inclinação do flange são suficientes para deformá-los em cerca de 6% de seu comprimento original, ou seja, em torno de 24 mm. Dessa maneira então, completa-se o ciclo térmico dos fios de NiTi. Algumas fotografias ilustrativas da máquina podem ser vistas no ANEXO II deste trabalho.

A inclinação do flange inclinado do mecanismo é responsável pela conversão do movimento axial do fio de SMA em movimento angular de eixo. Ele tem a finalidade de, através a força de tração e compressão do SMA associado à mola, gerar um torque no eixo que é responsável pela continuidade de seu movimento rotativo. O princípio envolvido na conversão do movimento merece uma atenção especial, e será detalhado adiante.

### 3.3 CONVERSÃO AXIAL-ROTACIONAL DE GLASAUER

Movimentos axiais podem ser convertidos em movimento angular de várias maneiras. No caso de motores de combustão interna a forma mais utilizada é baseada na utilização de um virabrequim. Este princípio consiste de um pistão, uma biela e um virabrequim, onde o plano da biela é perpendicular ao eixo do virabrequim.

Considerando agora a máquina de Glasauer, nota-se que os fios com memória de forma incorporam, ao mesmo tempo, as funções do pistão e da biela. Porém, o eixo do virabrequim, ao invés de inclinado a 90° em relação à biela, possui um pequeno ângulo de inclinação, veja o esquema apresentado na Figura 3.7. Este princípio é denominado Princípio do Eixo Inclinado e é aplicado em bombas axiais e motores hidráulicos.

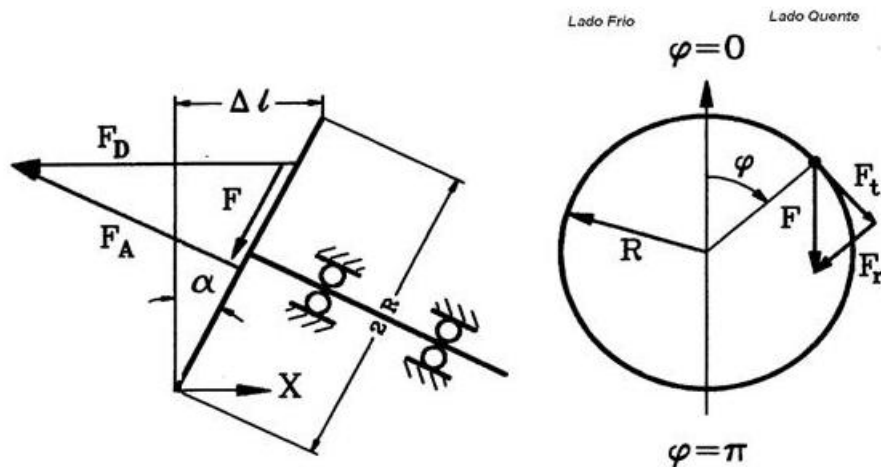


Figura 3.7: Princípio mecânico da árvore inclinada (Glasauer, 1996. Modificada).

Onde:

$\alpha$ : Ângulo de inclinação do flange;

$\Delta l$ : Variação de comprimento devido à inclinação do flange;

$F_D$ : Força do fio (de SMA);

$F_A$ : Projeção de  $F_D$  na direção do eixo;

$F$ : Projeção da  $F_D$  sobre o flange;

$F_t$ : Força tangencial em consequência de  $F_D$ ;

$F_r$ : Força radial em consequência de  $F_D$ ;

$\varphi$ : Ângulo de rotação do fio em relação ao eixo principal;

$R$ : Raio do flange.

Para se calcular o trabalho que uma máquina como esta pode realizar, partimos da tradicional equação do trabalho:

$$W = F \cdot d. \text{ Onde:} \quad (3.1)$$

$F$ : Força;

$d$ : Deslocamento.

No caso desta máquina em que o trabalho vem de um movimento circular, o deslocamento é angular e a força associada é a força tangencial. Logo, no calculo do trabalho de um movimento angular tem-se:

$$W = F_t \cdot \Delta\beta. \text{ Onde:} \quad (3.2)$$

$F_t$ : Força tangencial;

$\Delta\beta$ : setor de arco (no deslocamento angular).

Sendo:

$$\Delta\beta = R \cdot \Delta\varphi. \quad (3.3)$$

Para o trabalho infinitesimal do movimento temos que:

$$W = \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n F_t \cdot \Delta\beta. \quad (3.4)$$

$$W = \int F_t \cdot R \cdot d\varphi. \quad (3.5)$$

Para a máquina de Glasauer tem-se o diagrama de forças demonstrado na figura 3.7. Considerando que a força  $F$ , que é a projeção da força do fio  $F_D$  sobre o flange, tem sempre a direção vertical (perpendicular à direção de  $F_D$ ), através da figura 3.7, percebe-se que, por semelhança entre triângulos, o ângulo formado entre as forças  $F$  e  $F_r$  será sempre igual ao ângulo  $\varphi$ . Sendo assim, pela relação de seno pode-se escrever:

$$F_t = F \cdot \sin \varphi. \quad (3.6)$$

Ainda da figura 3.7, também por semelhança entre triângulos, como o ângulo entre as forças  $F$  e  $F_D$  é comum entre o triângulo formado por  $F_D$ ,  $F$  e  $F_A$ , e o outro triângulo formado por  $\Delta l$ ,  $2R$  e o ângulo  $\alpha$ , percebe-se então que se pode escrever o seno do ângulo  $\alpha$  como:

$$\sin \alpha = \frac{F}{F_D}. \quad (3.7)$$

E logo:

$$F = F_D \cdot \sin \alpha. \quad (3.8)$$

Substituindo-se então a equação 3.8 em 3.6, e a equação formada 3.9 em 3.5 temos:

$$F_t = F_D \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi. \quad (3.9)$$

$$W = \int F_D \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \cdot R \cdot d\varphi. \quad (3.10)$$

Do mesmo triângulo formado por  $\Delta l$ ,  $2R$  e o ângulo  $\alpha$ , ainda se pode descrever o alongamento  $\Delta l$  e a variação do comprimento do fio  $x$  de 0 (zero) a  $\Delta l$ . O alongamento máximo é escrito como função de seno na equação 3.11:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta l}{2R}. \quad (3.11)$$

E então:

$$\Delta l = 2R \cdot \sin \alpha. \quad (3.12)$$

Com o objetivo de descrever o alongamento  $x$  em função dos ângulos  $\alpha$  e  $\varphi$ , observa-se então as seguintes condições de contorno do mecanismo:

- Para  $\varphi = 0$ ,  $x = \Delta l$ ;
- Para  $\varphi = \pi$ ,  $x = 0$ .

Considerando ainda a relação definida na equação 3.12, tem-se então que:

- Para  $\varphi = 0$ ,  $x = 2R \cdot \sin \alpha$ ;
- Para  $\varphi = \pi$ ,  $x = 0$ .

A relação em função do ângulo  $\varphi$  que descreve tal alongamento é:

$$x = R \cdot \sin \alpha \cdot (1 + \cos \varphi). \quad (3.13)$$

Sabe-se da máquina de Glasauer que, no lado quente, o fio exerce uma força de tração sobre o eixo inclinado uma vez que a deformação imposta nele tende a ser recuperada. Na etapa seguinte do ciclo, do lado frio, uma força de tração precisa ser imposta no fio para que ele se deforme em função da inclinação do eixo. Considerando ainda que a força do fio no lado quente diminui linearmente com a recuperação da deformação e com o ângulo  $\varphi$ , de um valor máximo  $F_{Dmax,Q}$  até zero, e que do lado frio a força a ser aplicada no fio aumenta linearmente com a deformação e com

o ângulo  $\varphi$  até um valor máximo  $F_{Dmax,F}$ , pode-se descrever estas relações em função do alongamento de  $x$  se escrevermos a força do fio  $F_D$  como uma fração das forças máximas a quente e a frio:

$$F_D = F_{Dmax,Q} \cdot \frac{x}{\Delta l}. \quad (3.14)$$

$$F_D = F_{Dmax,F} \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta l}\right). \quad (3.15)$$

Desta maneira, na parte superior do mecanismo onde  $x = \Delta l$ , tem-se  $F_D = F_{Dmax,Q}$  e  $F_D = F_{Dmax,F} = 0$  (zero). E na parte inferior (transição de quente para frio) onde  $x = 0$ , teremos  $F_D = F_{Dmax,Q} = 0$  (zero) e  $F_D = F_{Dmax,F}$ . Conforme a descrição de diminuição e aumento lineares das forças mencionado.

A partir daí, substituindo-se a equação 3.14 em 3.10 tem-se:

$$W = \int F_{Dmax,Q} \cdot \frac{x}{\Delta l} \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.16)$$

Para desenvolvimento desta equação considere-se os parâmetros seguintes em função do alongamento  $\Delta l$ . Da equação 3.13:

$$x = R \cdot \sin \alpha \cdot (1 + \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot (1 + \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \Delta l \cdot (1 + \cos \varphi). \quad (3.17)$$

E da equação 3.12:

$$\Delta l = 2R \cdot \sin \alpha \therefore \frac{\Delta l}{2} = R \cdot \sin \alpha. \quad (3.18)$$

Introduzindo estas igualdades na equação 3.16 chega-se à:

$$W = \int F_{Dmax,Q} \cdot \frac{\frac{1}{2} \Delta l \cdot (1 + \cos \varphi)}{\Delta l} \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.19)$$

Como se trata do lado quente do mecanismo, o intervalo da integral é então  $[0, \pi]$ , desenvolvendo-se 3.19 então:

$$W = \int_0^\pi F_{Dmax,Q} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.20)$$

$$W = \frac{F_{Dmax,Q}}{2} \cdot \Delta l \int_0^\pi \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.21)$$

Resolvendo-se a integral:

$$\int_0^\pi \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi = -\frac{1}{2} \int_0^2 u \cdot du. \quad (3.22)$$

Onde:

$$u = 1 + \cos \varphi \text{ e } du = -\sin \varphi.$$

Então:

$$-\frac{1}{2} \int_0^2 u \cdot du = -\frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{u^2}{2} \right]_0^2 = 1. \quad (3.23)$$

E logo:

$$W = \frac{F_{Dmax,Q}}{2} \cdot \Delta l. \quad (3.24)$$

Da mesma maneira, para o lado frio, substituindo-se a equação 3.15 em 3.10 teremos:

$$W = \int F_{Dmax,F} \cdot \left( 1 - \frac{x}{\Delta l} \right) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \cdot R \cdot d\varphi. \quad (3.25)$$

Introduzindo novamente as equações 3.17 e 3.18 em 3.24 chega-se a:

$$W = \int F_{Dmax,F} \cdot \left[ 1 - \frac{\frac{1}{2} \Delta l \cdot (1 + \cos \varphi)}{\Delta l} \right] \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.26)$$

Neste caso a função varia entre  $[\pi, 2\pi]$ , logo:

$$W = \int_{\pi}^{2\pi} F_{Dmax,F} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \varphi) \right] \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.27)$$

$$W = \int_{\pi}^{2\pi} F_{Dmax,F} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \frac{\Delta l}{2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.28)$$

$$W = \frac{F_{Dmax,F}}{2} \cdot \Delta l \int_{\pi}^{2\pi} \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (3.29)$$

Novamente resolvendo-se a integral de maneira similar encontra-se que:

$$W = -\frac{F_{Dmax,F}}{2} \cdot \Delta l. \quad (3.30)$$

Sendo assim, o trabalho total do fio será a somatória de trabalhos atuantes e então:

$$W_{mec,Fio} = W_{mec,Eixo} = \frac{F_{Dmax,Q} - F_{Dmax,F}}{2} \cdot \Delta l. \quad (3.31)$$

Ou seja, como a força de restauração do fio de SMA no lado quente é maior do que aquela necessária para deformar o fio no lado frio, o eixo inclinado é colocado em movimento. A equação mostra ainda que o trabalho mecânico não depende do ângulo de inclinação  $\alpha$ . Daí resulta que o número de fios para aumento do trabalho mecânico pode ser aumentado sem problemas.

### 3.4 CÁLCULO DA POTÊNCIA DA MÁQUINA DE GLASAUER

Após entendidos, primeiramente o ciclo termodinâmico que caracteriza uma máquina térmica feita com material de memória de forma e, em seguida, as características principais de seu funcionamento, pode-se realizar a mesma simulação realizada por Glasauer para determinar a potência gerada por um fio de SMA neste ciclo térmico.

Sendo assim, tomando-se o ciclo térmico real descrito anteriormente e inserindo os dados característicos do equipamento, vemos o que se segue no diagrama apresentado na figura 3.8.

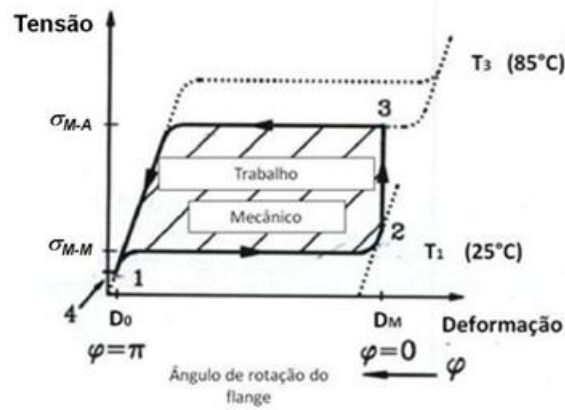


Figura 3.8: Diagrama tensão-deformação associado ao mecanismo de Glasauer (Glasauer, 1996. Modificada).

A área delimitada pelo ciclo corresponde ao trabalho que a máquina vai fornecer após sua ciclagem. Note-se no diagrama: as tensões de descarregamento ( $\sigma_{M-A}$ ) e de reorientação da martensita maclada ( $\sigma_{M-M}$ ), a deformação do fio quando não está submetido à força da mola ( $D_0$ ), a deformação após a tração da mola ( $D_M$ ), as temperaturas das fases quente e fria do ciclo e o ângulo de rotação do flange, lembrando que o ciclo completo significa uma rotação completa ( $2\pi$ ). Veja a figura 3.9 para melhor visualização.

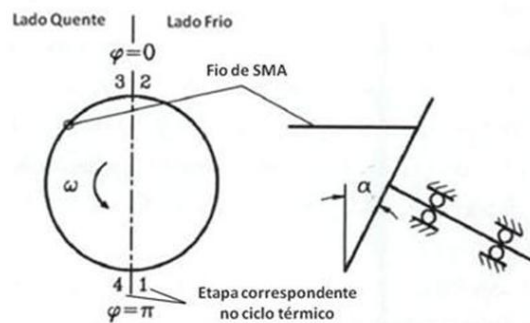


Figura 3.9: Correspondência entre o ciclo térmico e a rotação no mecanismo de Glasauer (Glasauer, 1996. Modificada).

A força de pré-tensão dos fios de SMA instalados na máquina tem uma carga de 50 N, isto é, quando a mola não está exercendo sua força no fio, ele está submetido a este carregamento. Após a ação da mola, ou seja, ponto 2 do diagrama da figura 3.8, chega-se a uma carga de 400 N. Já foi informado anteriormente que a deformação do fio é de 24 mm. Com esses dados, e considerando que o diagrama determina uma área próxima de um retângulo, através de uma conta simples, multiplicando a diferença de forças no fio pelo seu alongamento, Glasauer determinou o trabalho realizado por um fio de SMA:

$$W_{mec,Fio} = (F_{M-A} - F_{M-M}).\Delta l = (400 - 50 \text{ N}).24 \text{ mm} = 8400 \text{ N.mm} = 8,4 \text{ J} . \quad (3.17)$$

Nos ensaios realizados por Glasauer foram determinados alguns parâmetros da máquina. Dentre eles, a rotação do mecanismo que atinge 20 *RPM* e o período de uma volta do fio que é de  $T=3$  segundos. Considerando o ensaio da máquina montada com 24 fios, Glasauer determinou então que:

$$W_{máq} = W_{mec,Fio} \cdot N^o_{fios} = 8,4 \text{ J} \cdot 24 \text{ fios} = 201,6 \text{ J} . \quad (3.18)$$

Dividindo este valor pelo período de uma volta do fio determina-se finalmente a potência da máquina:

$$P_{máq} = \frac{W_{máq}}{T} = \frac{201,6 \text{ J}}{3 \text{ s}} = 67,2 \text{ W} . \quad (3.19)$$



## 4 APLICABILIDADE

O objetivo desse trabalho consiste em se conceber uma máquina térmica baseada em SMA para a utilização automotiva aproveitando da energia dos seus gases de escape. Mais que isso, se vislumbrou a aplicação de uma máquina térmica já existente e desenvolvida por Glasauer, nesta aplicação.

Sendo assim, a primeira etapa desta concepção compete em estabelecer limites geométricos para o equipamento. Nos capítulos anteriores do trabalho, pode-se encontrar as medidas principais da máquina desenvolvida por Glasauer, que são relativamente grandes para serem utilizadas num automóvel. Tendo em vista tal aplicação, se imaginou que o equipamento pudesse ter as dimensões de uma peça já existente nos carros, como um catalisador ou um silencioso de escapamentos. Essa concepção se deu em vista de que o mecanismo atuará nesta região do veículo (utilizando os gases de escape) e constitui-se, em sua geometria principal, de um cilindro.

### 4.1 CONCEITO

O conceito que se propõe neste trabalho é de reduzir o mecanismo projetado por Glasauer às dimensões de um catalisador automotivo. Desta maneira, para produzir a atuação dos fios de SMA, serão utilizadas a energia térmica provinda dos gases de escape do motor para aquecer o material, e o ar ambiente para resfriá-lo. No caso da máquina estudada, óleo a diferentes temperaturas era utilizado para tal fim.

O recipiente que comportará a máquina térmica de SMA deve contar então com dois ambientes de funcionamento isolados. Em um lado, conta com a passagem do gás provindo do motor em temperaturas que podem chegar até 680 graus Celsius (Pereira, 2011) dependendo de sua posição entre o coletor de escape do motor (parte junto à saída dos gases na câmara de combustão) e a saída na extremidade do escapamento. Do outro lado, deve contar com um fluxo de ar captado do ambiente externo do veículo, que para efeito de concepção pode ser considerado à temperatura ambiente de 25 °C.

As dimensões propostas para o conceito serão especificadas adiante, mas a idéia de se utilizar o formato de um catalisador, ou de um silenciador de escapamento veio da própria geometria da máquina térmica de Glasauer, que tem como parte mais importante, um eixo cilíndrico com fios de SMA instalados ao seu redor.

O mecanismo redimensionado deverá ser acoplado a um pequeno gerador que vai se aproveitar dessa rotação de eixo para gerar energia elétrica.

## 4.2 DIMENSIONAMENTO

Para definir os limites geométricos no qual a máquina poderá ser instalada, foi realizada uma busca entre catálogos automotivos de catalisadores e silenciosos a fim de se ter o conhecimento médio das medidas de tais peças para automóveis comuns. Em um catálogo universal da marca *Tuper* existem inúmeras peças relacionadas a escapamentos com suas funções e características principais.

A fim de se estabelecer medidas para simular a capacidade da máquina térmica, uma dessas peças, um catalisador universal que atende a uma série de carros nacionais com diferentes motorizações foi selecionado. Na figura 4.1 a seguir podem-se ver as características e dimensões do catalisador selecionado.



Figura 4.1: Catalisador selecionado para estabelecer geometria (Tuper, 2012).

As dimensões máximas para o conceito dessa máquina térmica devem ser próximas às medidas deste catalisador selecionado, imaginando-se que o mecanismo irá trabalhar dentro de um recipiente com uma geometria similar a esta. Logo, para que se possam simular alguns resultados da máquina térmica, estabeleceu-se que o equipamento seja formado por um cilindro principal com as dimensões do desenho mostrado na figura 4.2.

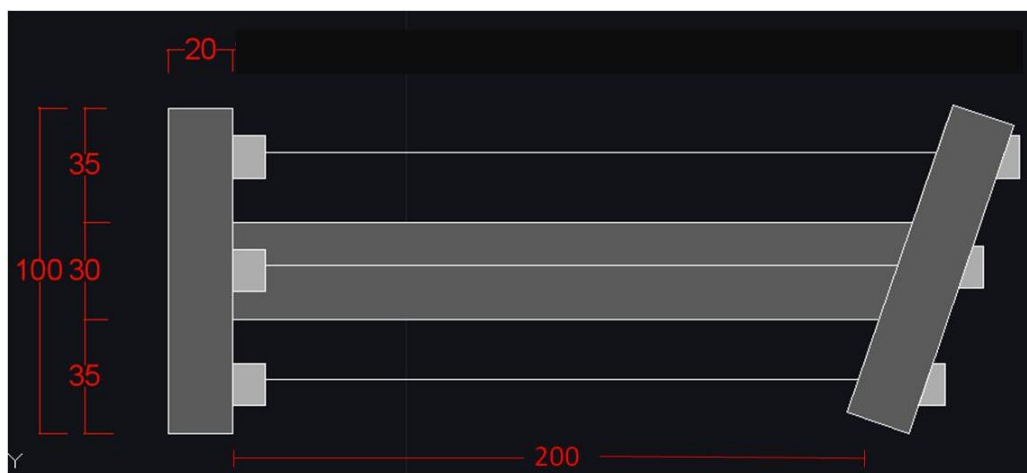


Figura 4.2: Dimensões estabelecidas para o eixo principal da máquina.

Tal mecanismo será inserido num recipiente como o demonstrado na figura 4.3 a seguir. Este recipiente conta com dois canais para os fluxos de gases de escape e de ar.

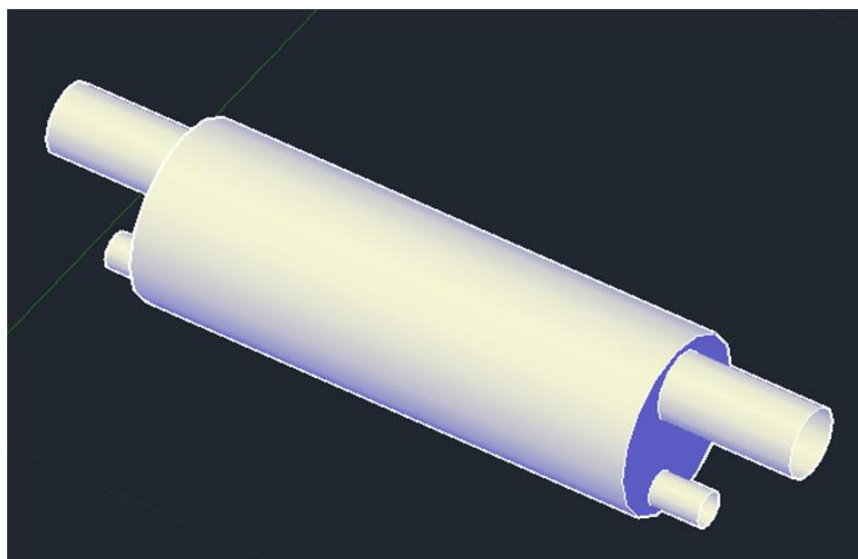


Figura 4.3: Formato e dimensões do recipiente que comportará o mecanismo.

No ANEXO III deste trabalho há também uma a vista isométrica ilustrando como seria o eixo principal da máquina com o máximo de fios possíveis em sua circunferência.

### 4.3 SIMULAÇÃO

O objetivo desta simulação é reduzir a máquina desenvolvida por Glasauer para as dimensões propostas anteriormente, e verificar sua capacidade de atuação sob a variação de diversas variáveis que compõem o mecanismo. Sendo assim, uma planilha de cálculos foi construída justamente para que se possa executar variações e averiguar-se a viabilidade da aplicação do mecanismo.

Primeiramente tentou-se reconstruir o ensaio realizado por Glasauer respeitando-se, na medida do possível, todas as medidas e referências disponíveis em seu trabalho. Tem-se de seu trabalho que os cálculos resultantes da sua máquina proveram do mecanismo com as seguintes características:

- Fios utilizados: NiTi;
- Diâmetro dos fios: 1,3 mm;
- Número de fios: 12 e 24;
- Comprimento dos fios: 400 mm;
- Alongamento dos fios: 24 mm (6%);
- Diferença de força no carregamento: 350 N;
- Período de rotação da máquina: 3 seg.

Para tais condições obteve que um fio era capaz de realizar um trabalho de 8400 J, com 24 fios, a máquina produzia um trabalho de 201,6 J e logo uma potência de 67,2 W. Simulando na planilha construída tais condições, foram obtidos então os mesmos resultados, utilizando-se em uma planilha de cálculos as seguintes relações:

$$W_{mec,Fio} = (\sigma_{M-A} - \sigma_{M-M}) \cdot A_{fio} \cdot \Delta l. \text{ Onde:} \quad (4.1)$$

$A_{fio}$ : área da seção transversal do fio de SMA;

$\sigma_{M-A}$ : tensão de descarregamento do SMA;

$\sigma_{M-M}$ : tensão de reorientação da martensita.

$$W_{maq} = W_{mec,Fio} \cdot N_{fios}^o \quad (4.2)$$

$$P_{maq} = \frac{W_{maq}}{T} \quad (4.3)$$

Para a visualização do comportamento da máquina de forma mais evidente foi gerado um gráfico que mostra o crescimento linear da potência da máquina com o aumento do número de fios instalados, veja a figura 4.4.

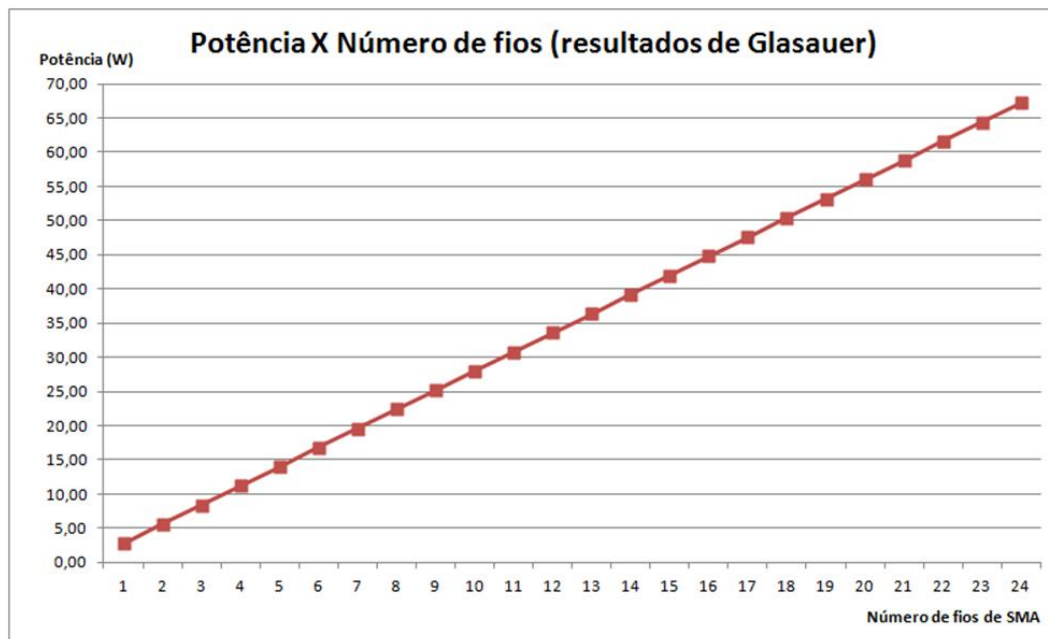


Figura 4.4: Gráfico demonstrativo da potência gerada pela máquina de Glasauer.

Verificada a autenticidade da planilha proposta, pode-se variar qualquer parâmetro de sua montagem e perceber como tal variação vai atuar no mecanismo. A primeira hipótese será diminuir as dimensões geométricas para as propostas, e, mantendo-se os outros valores como tensão submetida e diâmetro de fios constantes, identificar qual será a capacidade de geração de trabalho do equipamento.

Para esta simulação consideram-se então as seguintes grandezas em atuação:

- Fios utilizados: NiTi;
- Diâmetro dos fios: 1,3 mm;
- Número de fios: máximo possível para as dimensões da máquina;
- Comprimento dos fios: 200 mm;
- Alongamento dos fios: 16 mm (8%);
- Diferença de força no carregamento: 350 N;
- Período de rotação da máquina: 3 seg.

Para esta primeira concepção, não é possível utilizar o mesmo número de fios máximo que Glasauer utilizou já que o diâmetro da circunferência é menor. No entanto, configurando a máquina com 12 fios, pode-se observar pelo gráfico da figura 4.5 qual a potência que a máquina pode gerar.

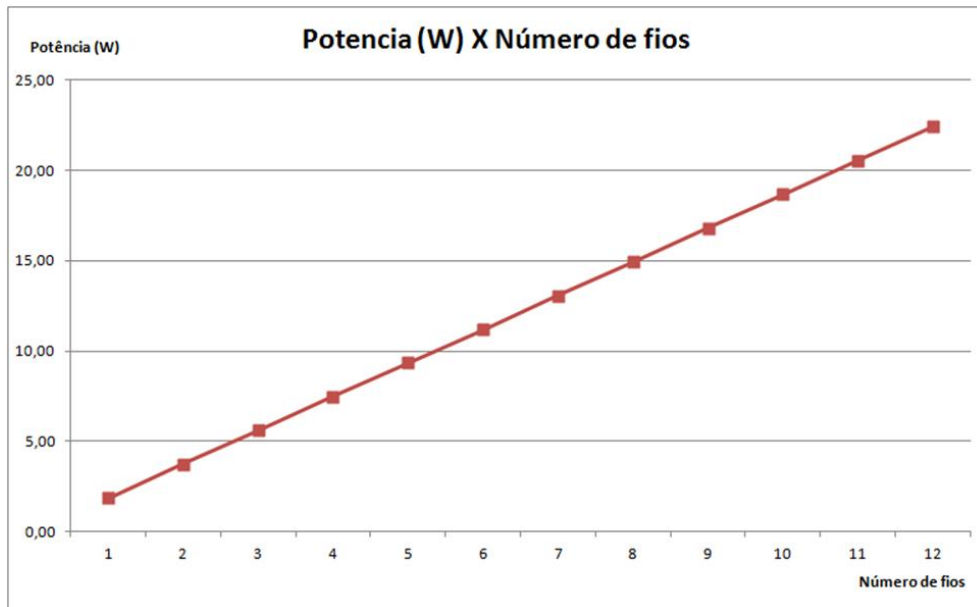


Figura 4.5: Gráfico de potência por número de fios com dimensões concebidas.

Nota-se desta simulação que a concepção proposta tem a capacidade de gerar pouco mais de 22 watts de potência. A partir deste ponto serão então variados os parâmetros que podem alterar esta geração de energia para buscar uma concepção ótima que tenha resultado mais expressivo.

#### 4.4 VARIANDO O NÚMERO DE FIOS

A variação mais evidente que se pode identificar é que o aumento no número de fios irá aumentar a potência da máquina, isto é bem claro já que os fios de NiTi são os responsáveis pela realização do trabalho. Glasauer realizou seus experimentos com a montagem de 12 ou 24 fios. Nesta concepção, para aqueles limites geométricos determinados, se estipula qual é o número máximo de fios que se pode instalar naquele perímetro dos flanges da máquina.

Sendo assim, dado o perímetro do flange com diâmetro  $D_{Flange} = 100 \text{ mm}$ , e o diâmetro das molas que tracionam os fios de NiTi de  $D_{mola} = 13 \text{ mm}$ , e estabelecendo ainda uma pequena distância construtiva de  $2 \text{ mm}$  entre cada mola instalada, pode-se calcular um número máximo de fios que podem ser instalados. Para o diâmetro de flange determinado, 19 fios de NiTi podem ser vislumbrados, e sendo assim a potência da máquina já alcançaria 35 watts.

Ainda tentando maximizar esta variável, se propôs que o flange pudesse comportar mais camadas de fios de SMA, já que o eixo tem função apenas estrutural e seu diâmetro pode ser bastante reduzido, deixando um espaço restante significativo nos flanges. Ao realizar esta simulação gerou-se o gráfico apresentado na figura 4.6 de potência pelo número de fios.

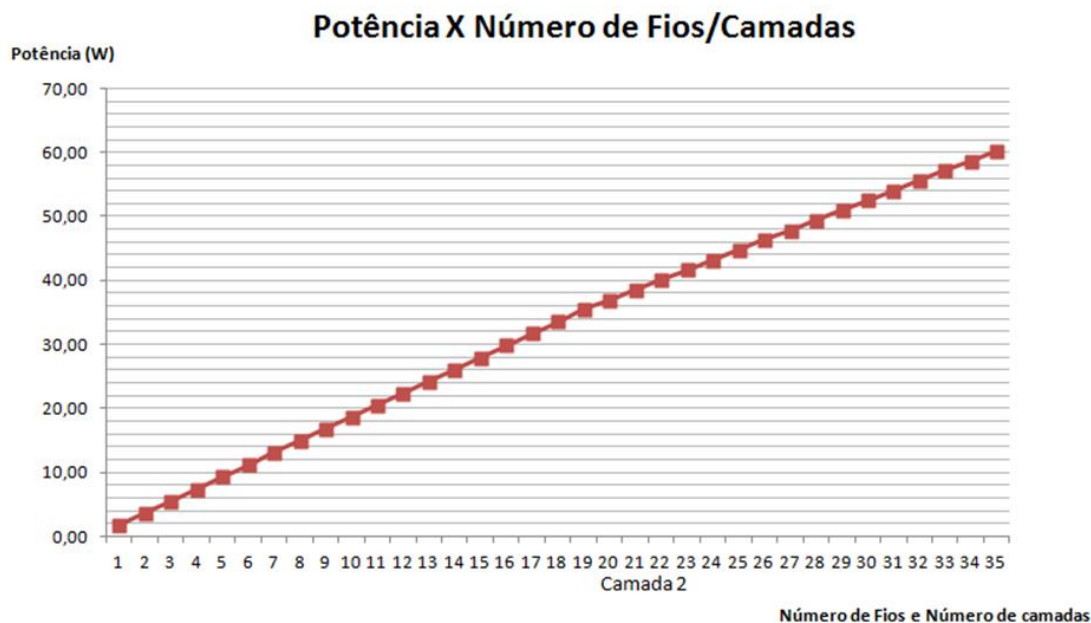


Figura 4.6: Gráfico de potência pelo número de fios considerando duas camadas de fios de SMA.

Nota-se do gráfico que há uma pequena queda na taxa de geração de potência na segunda camada de fios a partir do vigésimo fio. Isso se deve ao fato de que nesta condição, cada fio de SMA terá um alongamento menor que na primeira camada e, conseqüentemente o trabalho que realizará será também menor. O quanto este alongamento é menor foi calculado através de uma semelhança de triângulos, já que o ângulo de inclinação do flange é o mesmo para ambas as camadas. Verificou-se ainda nesses cálculos que, para o diâmetro do flange proposto nesta concepção, a introdução de uma terceira camada de fios de SMA, mesmo que geometricamente possível, não seria interessante, já que o alongamento dos fios se tornaria muito pequeno, e o trabalho realizado pelos mesmos seria insignificante.

Outra maneira de se conseguir instalar mais fios de SMA no eixo da máquina seria diminuir o diâmetro das molas de tração onde os mesmos são fixados. Mais uma vez lembrando que no conceito se imaginou a utilização total do perímetro dos flanges fazendo apenas algumas considerações físicas e geométricas para instalação. Logo, diminuindo-se o diâmetro dessas molas em alguns milímetros (de 13 a 9 mm), utilizando-se a mesma folga geométrica de 2 mm entre as mesmas, seria possível aumentar o número de fios como demonstra a tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1: Relação entre o diâmetro das molas e número de fios possíveis de serem instalados.

Diâmetro das molas (mm)	Número máximo de fios		Potência total (W)
	Camada 1	Camada 2	
13	19	16	60,26
12	20	17	63,67
11	22	19	70,51
10	24	21	77,34
9	26	23	84,17

Fica evidente então, como já era indicado nas relações apresentadas por Glasauer, que a potência gerada pela máquina está diretamente relacionada ao número de fios que se possa instalar na mesma.

#### 4.5 VARIANDO O PERÍODO DE ROTAÇÃO DO EIXO

Em seu experimento, Glasauer constatou através da prática que sua máquina completava uma rotação de eixo em um período de  $T=3$  segundos, e de suas expressões temos que a potência calculada depende inversamente deste período. Sendo assim, se for possível que a máquina tenha uma rotação mais rápida que esta, a potência gerada será maior.

Nesta simulação então se variou este período em alguns segundos, de 3 a 1,5 seg, para que se pudesse ter uma dimensão de como esta variável influenciaria na capacidade da máquina. O resultado dessa combinação de valores está demonstrado na figura 4.7.

Nota-se do gráfico que tal período exerce grande influência na capacidade de geração de potência do mecanismo. Uma pequena diminuição de um segundo neste período pode dobrar a potência gerada. Logo é um ponto importante a ser trabalhado na concepção e projeto desta máquina.

No entanto, uma ressalva também importante deve ser feita sobre este aspecto do mecanismo. O período de rotação é uma grandeza que vai depender não apenas de características construtivas do equipamento, como a qualidade do deslizamento e lubrificação, mas também da velocidade em que os gases envolvidos no processo serão capazes de aquecer e resfriar os fios de SMA suficientemente para que atuem de maneira eficaz.



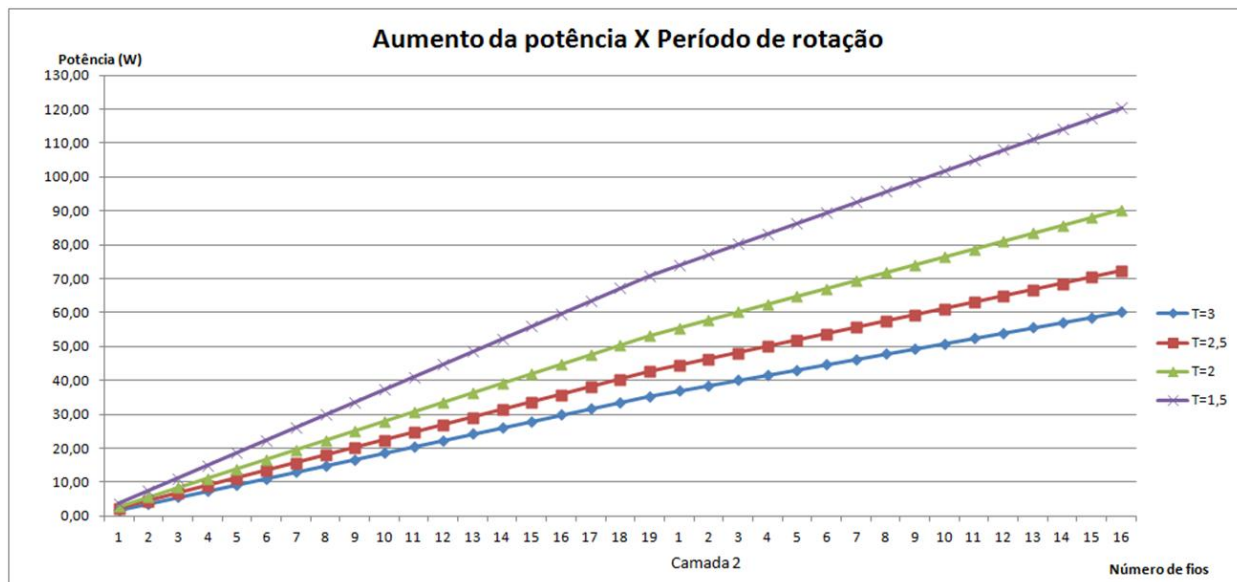


Figura 4.7: Potência gerada para diferentes períodos de rotação.

#### 4.6 VARIANDO CARACTERÍSTICAS DOS FIOS

Em sua máquina Glasauer ensaiou uma série de fios de SMA providos de diferentes lugares e com diferentes qualidades, mas em todos os casos, fios de NiTi. Ele ensaiou com objetivo de verificar a qualidade dos fios, porém, alterando-se características do material utilizado, pode-se perceber uma variação em seu trabalho realizado e, por consequência, na potência que se pode gerar.

A tabela 4.2 disponibiliza dados físicos, mecânicos, econômicos e propriedades funcionais de três classes de SMA: NiTi, CuZnAl e CuAlNi. Tais dados foram coletados da literatura, mas devem ser utilizados com censo crítico. De fato, a confiabilidade dos dados é algumas vezes pobre e muitas vezes nenhuma informação de como tais dados foram coletados está disponível. Alguns valores dependem muito das referências e algumas vezes são até mesmo contraditórios. Sendo assim, os autores poderiam promover uma padronização nos testes para definir os diferentes tipos de propriedades. Ainda assim, os autores acreditam que esta tabela pode ser uma referência válida se usada por pessoas críticas (Otsuka e Wayman, 1998).

Considerando-se a utilização dos fios de diferentes materiais referenciados na tabela 4.2 nas condições simuladas anteriormente, na concepção com duas camadas, 35 fios no total e as mesmas dimensões propostas ou aproveitadas do mecanismo de Glasauer, pode-se perceber uma variação na potência como indica a tabela 4.3.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas de ligas de SMA (Otsuka e Wayman, 1998).

Propriedade	Unidade	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Tensão última à tração	MPa	800 – 1000	400 – 700	700 – 800
Memória de tensão	%	8	6	5
Tensão máxima de recuperação	MPa	600 – 800	700	600

Tabela 4.3: Potência alcançada para vários materiais.

Material	Memória de tensão (%)	Tensão máxima de recuperação (MPa)	Potência (W)
NiTi	8	600 – 800	128,81
CuZnAl	6	700	113,75
CuAlNi	5	600	80,51

Nota-se da tabela 4.3 que se a máquina exercer o limite de tensão que os fios de SMA suportam (tensão máxima de recuperação) há um ganho significativo na potência que se pode gerar.

Comparando-se os materiais NiTi e CuAlNi, nota-se também que o alongamento máximo possível influencia significativamente o resultado. Mesmo possuindo limites de resistência similares, os 3% de alongamento a mais do fio de NiTi o permitem gerar uma potência cerca de 60% maior.

Outra maneira de se ganhar na geração de potência mexendo-se na tensão é variando o diâmetro do fio utilizado e, como tensão é resultado da divisão da força realizada pela área da seção transversal do fio, um fio de espessura maior exigirá uma realização de trabalho maior do SMA, já que implicará numa força maior. Claro que há uma observação importante neste parâmetro, para que se alongue um fio de mesmo comprimento com diâmetro maior, a tensão inicial de pré-carga da máquina, ou seja, a tensão exercida pelas molas, também deverá ser maior.

Além disso, apenas variar a espessura de um SMA, mantendo-se as condições de tensão e temperatura que vão atuar na sua recuperação, pode implicar na incapacidade do material em realizar sua completa transformação de fase, o que acarretaria na realidade em uma perda para o sistema. Isto pode ser mais bem compreendido retornando-se ao conceito relacionado à figura 3.5 do capítulo 3.1.

Pouco se pode estimar aqui em relação às curvas de tensão por deformação que a máquina proposta geraria. No entanto, se for viável realizar algum ajuste no diâmetro dos fios, sem comprometer a eficiência das transformações de fase, este seria um aspecto importante a ser avaliado, pois uma pequena variação oferece um grande ganho. Na planilha construída, por exemplo, alterando-se um décimo de milímetro no fio (de 1,3 para 1,4 mm), mantendo-se os outros parâmetros, a potência total gerada por 35 fios passaria de 60,26 para 69,89 W.

#### **4.7 APLICAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA**

Depois de realizada essa série de simulações sobre o potencial deste conceito de realizar trabalho, se deve perguntar o que é possível se fazer com a quantidade de potência gerada. Neste capítulo, um breve estudo sobre a aplicação de tal potência foi realizado.

Tendo em vista que esta máquina trabalharia num automóvel, buscou-se por qualquer elemento dentre os vários sistemas automotivos que pudessem ser supridos com a energia aproveitada pela máquina térmica. Claro que a potência obtida, mesmo com as melhores condições possíveis simuladas, é limitada, e obviamente imaginar este mecanismo substituindo alguma máquina de um carro, como um compressor de ar condicionado ou um alternador, é totalmente inviável. No entanto, baixando as expectativas a níveis razoáveis, a máquina térmica proposta neste trabalho pode sim ser útil.

A aplicação mais interessante e direta que se imaginou para os níveis de potência alcançados foi a utilização desta para carregar a bateria do automóvel, se não total, parcialmente.

As baterias automotivas tem a função principal de transmitir energia para o funcionamento do motor de partida dos veículos. Quando o mesmo se encontra desligado, ela também tem a função de prover energia para sistemas de funcionamento contínuo dos automóveis, como alarmes, memórias de rádio e injeção eletrônica ou da ignição, computador de bordo, etc. Porém, com o carro em funcionamento, a bateria não é utilizada. O alternador do carro é o responsável por gerar toda a energia elétrica que o veículo necessita (através da potência do motor) e também por recarregar a bateria.

As baterias automotivas apresentam uma alta resistência térmica, porém, o calor gerado nas placas durante o processo de recarga tem dificuldade em se dissipar, provocando o aumento da temperatura interna da bateria. A temperatura elevada leva à queima dos elementos químicos que constituem a massa ativa (elementos que fazem parte da reação de carga e descarga). Esse efeito é conhecido como sobrecarga, e ocorre quando se tem uma corrente alta passando por um longo período de tempo pela bateria, seja este período contínuo ou com interrupções. Para se evitar este problema, em geral, o diferencial de potencial elétrico admissível para recarga da bateria deve encontrar-se entre 13,5 e 14,5 V, usualmente regulada a 13,6V. Toda vez que o limite de 14,5 V é

ultrapassado tem-se o início de um superaquecimento na bateria originando uma possível sobrecarga.

No entanto, com essa tensão a bateria não atinge seu nível máximo de carga. Na realidade, a bateria funciona normalmente com cerca de 70% de sua carga total (Brosset e Bodereau, 2004). Para carregar uma bateria é preciso introduzir certa quantidade de “ampères horas” pelo meio de uma corrente elétrica (corrente de carga). Todavia, a bateria não armazena “ampères horas” passivamente, mas desenvolve certa repulsão à corrente de carga. Como consequência, o carregador deve ser programado para se ajustar constantemente às condições da bateria e superar sua resistência, sendo que em alguns momentos o diferencial de potencial elétrico deve superar a tensão limite para que não ocorra o superaquecimento.

Sendo assim, para o valor de diferencial de potencial elétrico normalmente utilizado, e considerando ainda que a bateria deve ser recarregada com uma corrente equivalente a 10% do valor da capacidade nominal da bateria, analisando, por exemplo, um automóvel popular VW Gol que utiliza uma bateria de 60 Ah obtém-se a seguinte relação:

$$P = VI. \quad (4.1)$$

Se  $V = 13,6 \text{ V}$  e  $I = 6 \text{ A}$ , então:

$$P = 13,6 \cdot 6 = 81,6 \text{ W}. \quad (4.2)$$

Ou seja, supondo que ambas a tensão e a corrente de carregamento de uma bateria automotiva sejam constantes, com uma potência elétrica de 82 W seria possível carregá-la.

A tabela 4.4 indica o tempo de carregamento de baterias em várias condições.

Tabela 4.4: Tempo de carga de baterias.

Tensão da bateria em vazio (Volts)	Tempo de recarga (Horas)
12,00 a 12,20	6 a 12
11,80 a 11,99	10 a 16
11,50 a 11,79	16 a 20
11,00 a 11,49	20 a 24
Baterias profundamente descarregadas	24 a 30

Os valores indicados na tabela 4.4 indicam o carregamento completo (100%) de baterias descarregadas. Considerando que a bateria automotiva, como informado, normalmente trabalha com carregamentos de 70% de sua capacidade máxima, e considerando ainda, que ela não está descarregada, um tempo bem inferior a 6 horas pode ser esperado para seu carregamento.

Fica evidente como a máquina térmica proposta tem boa perspectiva de ser útil. No entanto, a potência requerida nesta função não é completamente compatível com a simulação realizada. Apenas nas condições mais ideais imaginadas tal potência foi alcançada.

Dessa maneira estudou-se uma segunda aplicação possível para a energia provinda da máquina, que seria aplicá-la diretamente em algum aparelho do automóvel. Para o mesmo automóvel mencionado anteriormente, um VW Gol, por exemplo, tem-se que a sua bomba elétrica de combustível funciona com uma corrente  $I=3,5$  A e um diferencial de potencial elétrico  $V=12$  V. Dessa maneira, utilizando-se a mesma expressão de potencia elétrica, resulta que com 42 W de potência seria possível ativar esta bomba.

É verdade que esses valores apresentados variam bastante entre as peças de diferentes veículos, e quanto maior e mais equipado este for, em geral mais energia é requerida para ativar seus sistemas. No entanto, fica claro com esse exemplo que a máquina térmica proposta neste trabalho é bastante promissora. A possibilidade de realização de um projeto, a viabilidade de confecção e viabilidade econômica desta máquina obviamente vão mostrar inúmeros fatores que dificultarão a realização das idéias estudadas aqui. Mas, para todo efeito, as simulações realizadas mostram que vale a pena se estudar a fundo esta proposta.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvida uma análise da máquina térmica baseada no comportamento termomecânico das SMA proposta por Glasauer (1996). Essa máquina consiste basicamente de um tambor envolto por fios de SMA. O princípio de operação da máquina consiste de deformação os fios de SMA por meio de molas a uma temperatura abaixo de  $M_f$  (25°C) e aquecimento por meio de um banho a uma temperatura acima de  $A_f$  (85°C). Por meio de um disco inclinado a força axial que os fios exercem ao serem aquecidos é convertida em um torque que pode então ser utilizado para alguma finalidade. A máquina funciona com 24 fios de NiTi e cada fio, ao ser aquecido, realiza um trabalho de 8,4 J. A rotação máxima atingida pela máquina é de 20 RPM e com isso a sua potência é de 67,2 W.

Depois de concluída a análise da máquina de Glasauer foi proposta uma nova máquina térmica, com princípio de funcionamento similar a esta, porém com dimensões proporcionais a sua aplicação no caso automotivo. Para se estudar a viabilidade deste novo mecanismo foi construída uma planilha de simulação onde se poderiam variar alguns valores construtivos da máquina e verificar como essa alteração se reflete no trabalho realizado. Dentre as simulações desenvolvidas se destacaram: o número de fios que possa ser instalado, o período de rotação da máquina e o material utilizado, principalmente em relação a sua capacidade de alongamento. Trabalhando nestes parâmetros da construção do mecanismo, o resultado obtido por Glasauer foi alcançado em vários casos e até mesmo superado.

Dessa análise concluí-se que a redução da máquina de Glasauer para aplicação no caso automotivo é tecnicamente viável, uma vez que ela permite a conversão de energia térmica em mecânica, e que essa energia, mesmo que em pequena escala pode ser aproveitada nos próprios sistemas automotivos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACDelco, Catálogo de aplicações ACDelco Freedom 2010 ([www.acdelcofreedom.com.br](http://www.acdelcofreedom.com.br)).
- Banks, Ridgway M., US03913326, Energy Conversion Systems (1975).
- Brosset, Michel G. E., Bodereau, Ghislaine C., Conhecendo as baterias, Documentação MBT – Energia Autônoma (ver. Jun. 2004).
- Buehler W. J., Gilfrich J. V., Wiley R. C., Effects of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi, Journal of Applied Physics 34 (1963).
- Castilho W. S. e da Silva E. P., Algumas Aplicações das Ligas com Memória de Forma. Artigo: Sinergia, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 99-108 (2011).
- Delaey L., Krishnan R. V., Tas H., Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1. Structural and microstructural changes associated with the transformations. Journal of Materials Science, 9 ed., p. 1521-1535 (1974).
- Fernandes F. M. B., Ligas com memória de forma. Departamento de Ciência dos Materiais CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa (2003).
- Funakubo H., Shape memory alloys. Gordon and Breach Science Publishers (1987).
- Glasauer F. U., Experimentelle Untersuchungen und Aufbau einer Wärmekraftmaschine (1996).
- GM Receives - E Award to Explore Thermomechanical Waste Heat Recovery Using SMA Heat Engine. <http://www.greencarcongress.com/2009/10/gm-sma-20091028.html>.
- Guimarães J. R. C., Conceituação, Cinética e Morfologia da Transformação Martensítica em Aços. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol.1 (1981).
- Iwanaga H., Tobushi H. and Ito H., Basic research on output power characteristics of a shape memory alloy heat engine (1988).
- Jacot A., Ruggeri R., Clingman D., Shape memory alloy device and control method, U.S. Patent 7,037,076 (2006).
- Johnson A. D., IECEC, page 530-534 (1975).
- Johnson Controls, Treinamento Técnico em Baterias Automotivas.
- Kudva J., Overview of the DARPA smart wing project, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 15 (2004).
- Kurdjumov G. V., Khandros L. G., First reports of the thermoelastic behaviour of the martensitic phase of Au-Cd alloys, Doklady Akademii Nauk SSSR 66 (1949)
- Lagoudas D. C., Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications (2008).
- Lagoudas D., Vandygriff E., Processing and characterization of niti porous sma by elevated pressure sintering, Journal of intelligent material system and structures 13 (2002).

- Mabe J., Cabell R., Butler G., Design and control of a morphing chevron for takeoff and cruise noise reduction, in: Proceedings of the 26th Annual AIAA Aeroacoustics Conference, Monterey, CA, (2005).
- Machado L.G., Savi M.A. Aplicações odontológicas das ligas com memória de forma. Revista Brasileira de Odontologia. vol. 59, n. 5, pp. 302-306 (2002).
- Mani R., Lagoudas D., Rediniotis O, MEMS based active skin for turbulent drag reduction, in: Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Vol. 5056, San Diego, CA, (2003).
- Mantovani D. Shape memory alloys: Properties and biomedical applications. Journal of the Minerals. Metals and Materials Society, 52: 36-44 (2000).
- Melton K., Mercier O., Deformation behavior of NiTi-based alloys, Metallic Tras. 9A (1978)
- Miyazaki S., Otsuka K., Deformation and transformation behavior associated with the r-phase in Ti-Ni alloys., Metallurgical Transactions (1986).
- Morris C., Olson G.B., Dislocation Theory of Martensitic Transformations in Dislocations in Solids. Elsevier Science Publishers B. V. (1986).
- Nam C., Chattopadhyay A., Kim Y., Application of shape memory alloy (SMA) spars for aircraft maneuver enhancement, in: Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Vol. 4701, San Diego, CA, (2002).
- Otsuka K., Wayman C. M., Shape memory materials. Cambridge University Press (1998).
- Pachter, John J. US4150544, Engine (1979).
- Peffer A., Denoyer K., Fossness E., Sciulli D., Development and transition of low-shock spacecraft release devices, in: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Vol. 4 (2000).
- Pereira, Jean César Barbosa, Estudo de uma bancada para ensaio de motores diesel. UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (2011).
- Pitt D., Dunne J., White E., Garcia E., SAMPSON smart inlet SMA powered adaptive lip design and static test, Proceedings of the 42<sup>nd</sup> AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Seattle, WA, 16–20 April 2001 (2001).
- Santos, Cláudia Nazaré dos, Aspectos Cristalográficos da Transformação Martensítica de uma Liga Fe-27%Ni, Rio de Janeiro (2008).
- Sanders B., Crowe R., Garcia E., Defense advanced research projects agency – Smart materials and structures demonstration program overview, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 15 (2004).
- Schetky L., Shape-memory alloys, Scientific American 241 (74-82). (1989).
- Strelec J. K., Lagoudas D. C., Khan M. A., Yen J., Design and implementation of a shape memory alloy actuated reconfigurable wing, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 14 (2003).
- Tawfik M., Ro J., Mei C., Thermal post-buckling and aeroelastic behaviour of shape memory alloy reinforced plates, Smart Materials and Structures 11 (2002).



Tuper, Catálogo de produtos 2012/2013 – Tuper ([www.tuperescapamentos.com.br](http://www.tuperescapamentos.com.br)).

Turner T., Buehrle R., Cano R., Fleming G., Modeling, fabrication, and testing of a SMA hybrid composite jet engine chevron concept, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2006).

VTO, Catálogo VTO Automotivos – Bomba de combustível - 3ª edição 2012 ([www.vtoautomotivos.com.br](http://www.vtoautomotivos.com.br)).

Wakjira J. F., The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design (2001).

Wayman M., Harrison J., The origins of the shape memory effect. *Journal of Minerals, Metals, and Materials* 26–28 (1989).

Wax S., Fischer G., Sands R., The past, present, and future of DARPA's investment strategy in smart materials, *Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society* 55 (12) (2003).

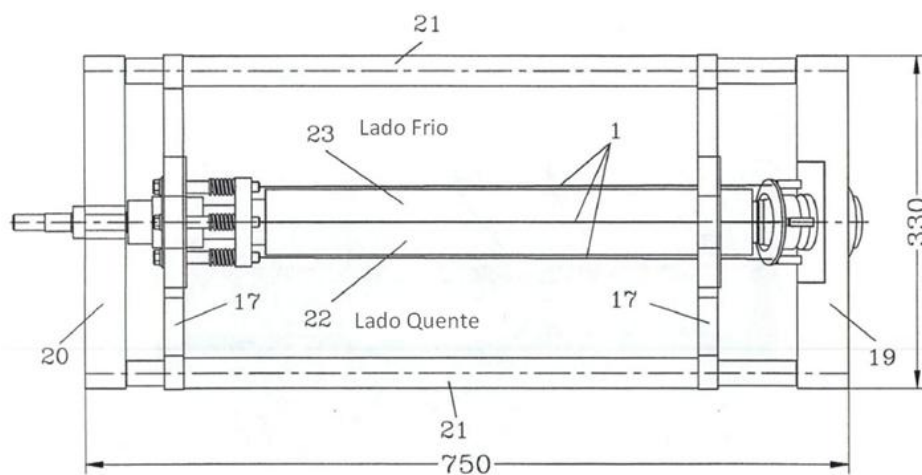
Willey C., Huettl B., Hill S., Design and development of a miniature mechanisms tool-kit for micro spacecraft, in: *Proceedings of the 35<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium*, Ames Research Center, 9–11(2001).

Zhu J. J., Liang N. G., Huang W. M. e Liew K. M., Energy Conversion in Shape Memory Alloy Heat Engine Part I: Theory (2001).

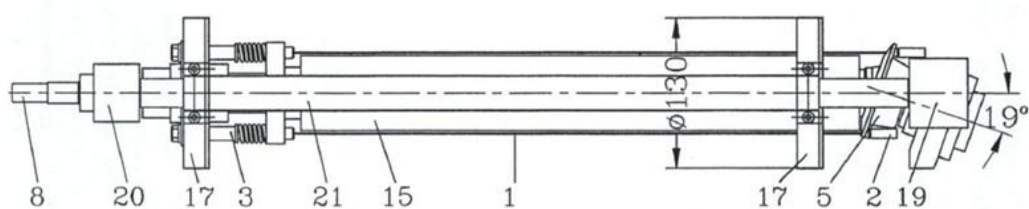
Zhu J. J., Liang N. G., Huang W. M. e Liew K. M., Energy Conversion in Shape Memory Alloy Heat Engine Part II: Simulation (2001).

## 7 ANEXOS

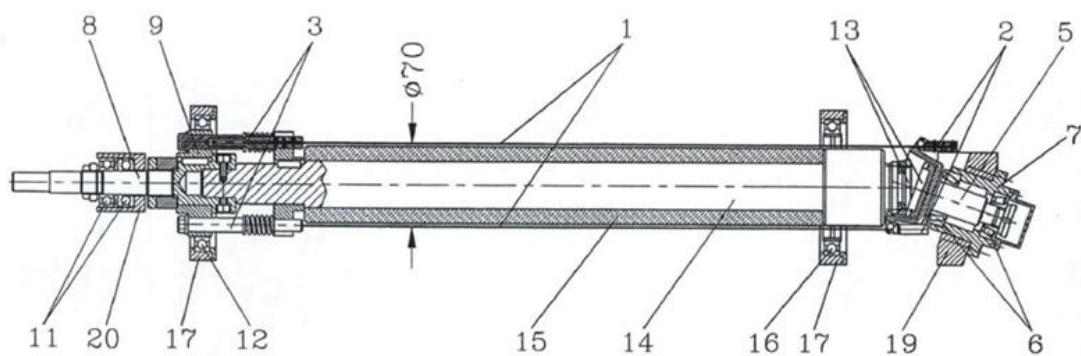
		Pág.
Anexo I	Detalhamento das partes componentes da máquina de Glasauer	31
Anexo II	Fotografias da máquina de Glasauer	32
Anexo III	Desenhos ilustrativos da concepção da máquina térmica	41



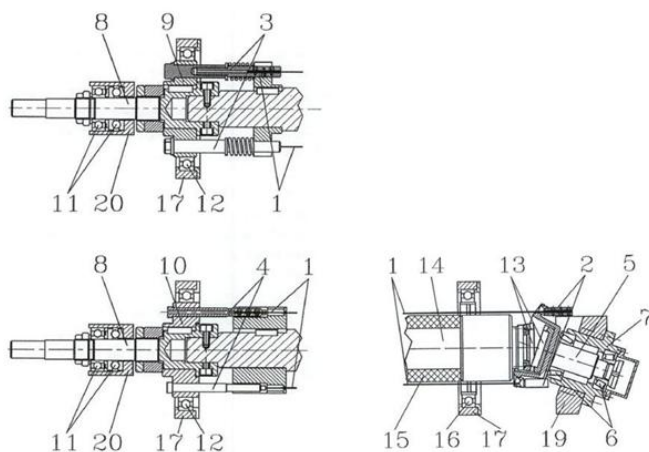
Vista superior da máquina térmica.



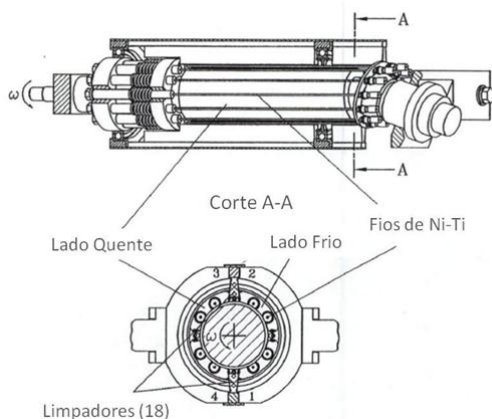
Vista lateral do sistema de eixos.



Vista lateral em corte do sistema de eixos.



Vista em detalhe dos flanges do eixo.

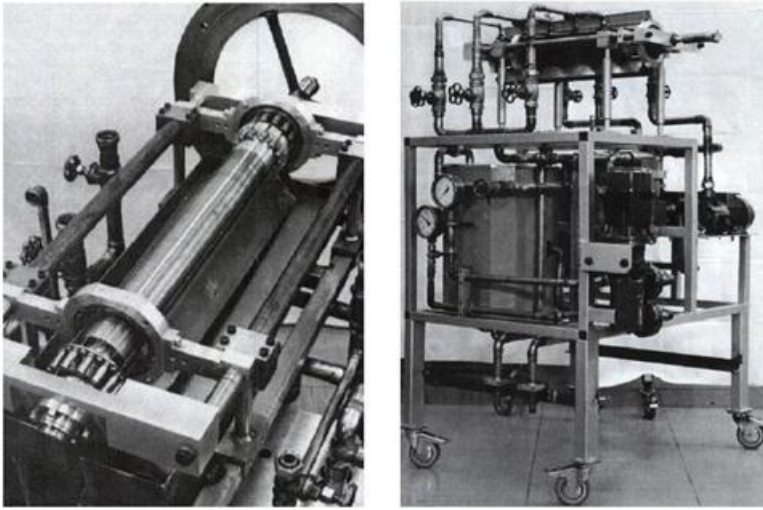


Vista em perspectiva e corte do eixo.

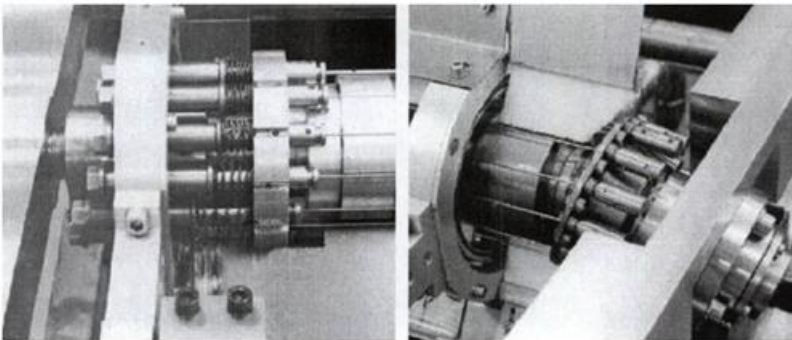
#### LEGENDA:

1. Fios de Ni-Ti	13. Acoplamento rígido - composto por duas engrenagens de dentes retos
2. Fixadores dos fios de Ni-Ti no eixo inclinado	14. Eixo principal
3. Fixadores dos fios de Ni-Ti no ensaio com 12 fios	15. Tubo de plástico (invólucro)
4. Fixadores dos fios de Ni-Ti no ensaio com 24 fios	16. Rolamento do eixo intermediário
5. Eixo de saída inclinado	17. Mancais de apoio dos rolamentos
6. Mancais de rolamento do eixo inclinado	18. Limpadores
7. Apoio de mancais do eixo inclinado	19. Apoio do eixo inclinado
8. Eixo de entrada	20. Apoio do eixo
9. Flange para o ensaio com 12 fios	21. Eixos de suporte da máquina
10. Flange para o ensaio com 24 fios	22. Lado quente
11. Mancais de rolamento de eixo axial	23. Lado frio
12. Mancais de rolamento de eixo radial	

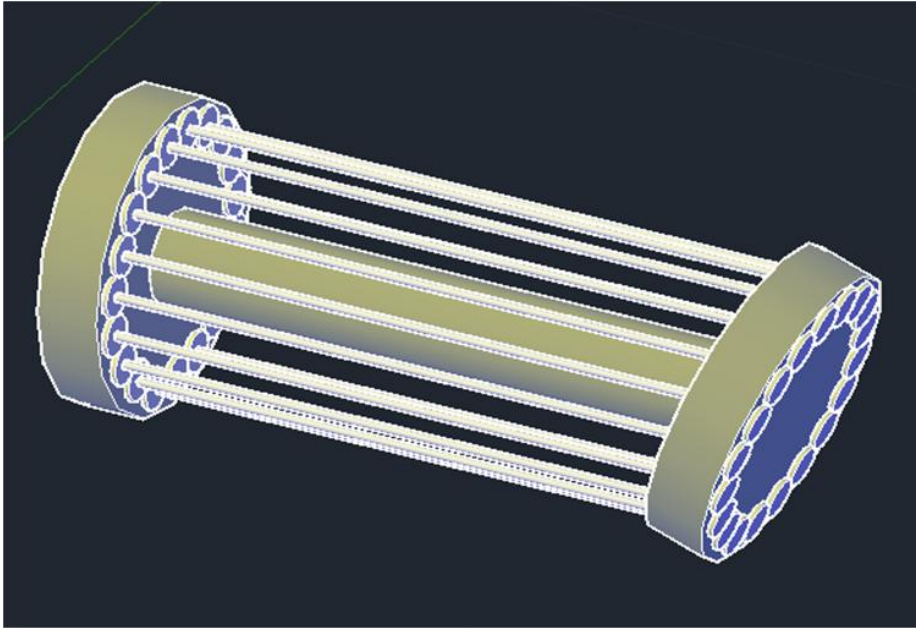
Fotos ilustrativas do mecanismo:



Fotografia da máquina térmica de Glasauer.



Fotografia detalhada dos flanges da máquina térmica de Glasauer.



Vista isométrica do eixo principal da máquina com o número máximo de fios instalados em sua circunferência (19 fios, para as medidas propostas em princípio).



Vistas lateral e frontal do eixo principal do mecanismo concebido.